



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

ПРИОРИТЕТНЫЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ  
"ОБРАЗОВАНИЕ"



**Проект «Инновационная образовательная среда в классическом университете»**

Пилотный проект № 22 «Разработка и внедрение  
инновационной образовательной программы «Прикладные математика и физика»»

Физический факультет

Научно-образовательный центр «Электрофизика»

**С.Б.Афанасьев, Ю.К.Стишков**

# **СБОРНИК ОПИСАНИЙ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург  
2007

УДК 536.2, 53.04, 53.05

- Рецензент: д.ф.м.н. проф. Яснoв Л.В.
- Печатается по решению методической комиссии физического факультета СПбГУ.
- Рекомендовано Ученым советом физического факультета СПбГУ.

**С.Б.Афанасьев, Ю.К.Стишков**  
**СБОРНИК ОПИСАНИЙ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**  
**ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛАБОРАТОРИИ – СПб., 2007**

Представлены описания некоторых лабораторных работ высоковольтной лаборатории Научно-образовательного центра «Электрофизика». Лаборатория относится к блоку специальных дисциплин модуля 1 программы «Прикладные математика и физика». В работах исследуются некоторые явления и процессы, возникающие в высоковольтных устройствах и конструкциях. Это коронный электрический разряд, естественная тепловая конвекция, влияние электрического ветра на теплообмен, влияние барьерной изоляции на импульсную электрическую прочность воздушных промежутков и влияние барьерной изоляции на процессы в чехле коронного разряда. Все экспериментальные установки компьютеризированы, при проведении эксперимента широко используются цифровые методы обработки и передачи информации. В работах использованы результаты исследований и оригинальные программные продукты студентов направления «Прикладные математика и физика».

Пособие предназначено для студентов 4–6-го курсов и аспирантов направления «Прикладные математика и физика» специализирующихся в области тепло- и электрофизики.

## Оглавление:

Лабораторная работа №1 Исследование термогравитационной конвекции .....	4
Лабораторная работа №2 Интенсификация теплоотвода от нагреваемого тела при помощи электрического ветра .....	30
Лабораторная работа №3 Коронный разряд в симметричной системе электродов .....	59
Лабораторная работа №4 Влияние барьерной изоляции на газовый разряд .....	97
Лабораторная работа №5 Экспериментальное исследование импульсного пробоя воздушного промежутка при наличии барьерной изоляции .....	122

## Лабораторная работа №1

### Исследование термогравитационной конвекции

Работа направлена на исследование одной из фундаментальных проблемы теплофизики – естественной тепловой конвекции.

#### 1. Цель работы

1. Провести экспериментальное исследование распределения температур и скорости воздушного потока от нагреваемого теплового элемента заданной формы и заданной мощности.
2. Провести компьютерное моделирование процесса термогравитационной конвекции в ограниченном пространстве с заданным тепловым элементом. Расчитать распределение температур и скоростей воздушного потока.
3. Сравнить результаты расчёта с экспериментальными данными, оценить погрешность.
4. Визуализировать тепловой конвективный поток с помощью полутеневого метода Тёплера и получить мгновенное распределение температур в экспериментальной кювете.

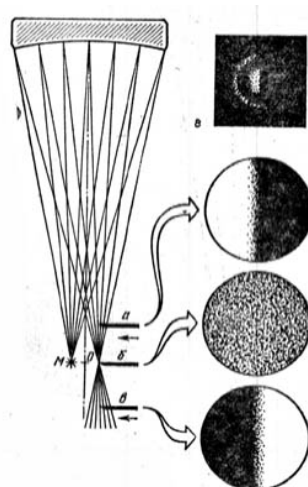
#### 2. Предварительные сведения

В 1859 г. великий французский физик Леон Фуко предложил свой метод контроля вогнутых оптически точных поверхностей. Этот метод настолько же изящен по своей идее, насколько чувствителен и надежен на практике. Его суть сводится к следующему. Близ центра кривизны  $O$  (на удвоенном фокусном расстоянии) вогнутого зеркала (рис.1) устанавливается крошечный, но яркий источник света (“искусственная звезда”). Этой звездой может служить маленькое ( $0,1 \div 0,3$  мм) отверстие в куске алюминиевой фольги, которой оборачивают лампочку карманного фонарика. Лампочка может быть вставлена в патрон от елочной гирлянды или просто припаяна к проводам, ведущим к батарее или трансформатору, так как “искусственная звезда” установлена вблизи центра кривизны зеркала (чуть сбоку от оси зеркала), зеркало строит ее изображение также вблизи центра кривизны, но по другую от оси сторону. Если позади изображения “искусственной звезды” поместить глаз, чтобы весь пучок света “провалился” в зрачок, мы увидим, что зеркало равномерно по всей поверхности залито светом “звезды”. Это и понятно: ведь в этот момент все без исключения лучи “звезды”, отраженные зеркалом соберутся в зрачке.

Представим себе, что испытывается идеальное сферическое зеркало. Это значит, что лучи, отраженные каждым участком зеркала, каждой его зоной, все пересекутся в точке фокуса. Введем непрозрачный экран с



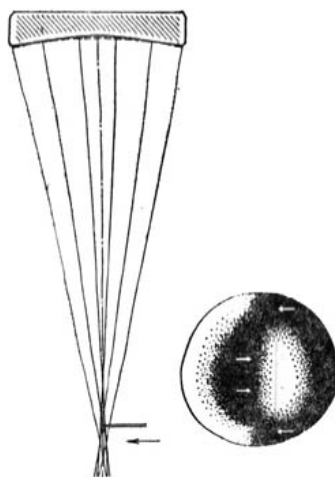
острым (без зазубрин) краем (например, лезвие безопасной бритвы) в вершину конуса лучей, чтобы перекрыть изображение “звезды”. Одновременно смотрим на зеркало, чтобы оно оставалось равномерно освещенным. Если лезвие, вводить очень осторожно, чтобы оно перекрыло только часть дифракционного изображения “звезды”, зеркало померкнет лишь отчасти, но также по всей поверхности одновременно. Важно понять, что в построении каждого участка изображения “звезды”, даже если это изображение дифракционное, участвует вся поверхность идеального сферического зеркала одновременно. Именно поэтому, какую бы часть изображения мы ни перекрыли, зеркало будет гаснуть одновременно по всей поверхности (рис.2.1, б,г).



**Рисунок 2.1.** Схема метода Фуко: а - предфокальное положение ножа, б - фокальное положение ножа, в - зафокальное положение, г - сильно увеличенный вид дифракционного изображения точки М, пересеченной ножом Фуко в положении б.

Если несколько изменить опыт и ввести лезвие, которое принято называть ножом Фуко, в конус лучей до их пересечения в фокусе. Нож расположен в этом случае на 1÷2 см ближе к зеркалу. Это положение называется предфокальным. Если теперь посмотреть на зеркало, конечно, оставляя глаз все так же в пучке света, то можно увидеть, что часть зеркала погасла, тогда как другая часть его по-прежнему освещена лампой. Если нож введен справа, то погаснет правая часть. Это происходит потому, что нож пересек часть пучка, идущую от правой части зеркала.

Теперь допустим, что зеркало – не идеальная сфера, а имеет завал на краю и яму в центре (рис.2.2). В этом случае радиус кривизны центральной части короче радиуса кривизны края зеркала. Это означает, что и фокусное расстояние центра короче фокусного расстояния краев; фокус некоторой промежуточной зоны окажется где-то между фокусами центра и края.



**Рисунок 2.2.** Теньевая картина, когда зеркало имеет в центре большую кривизну, чем на краях.

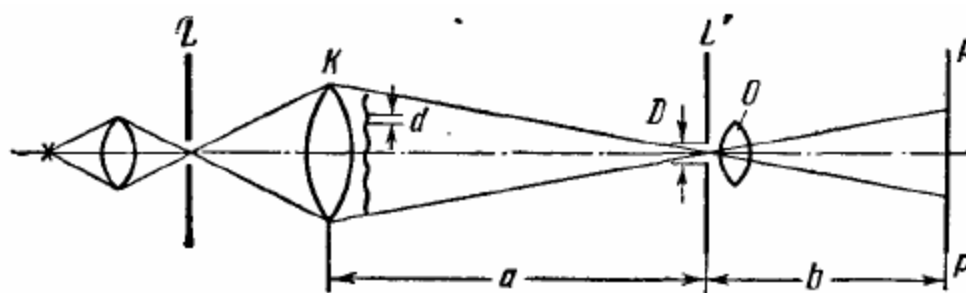
“Поймаем” глазом пучок чуть дальше фокусов всех зон и снова введем нож в районе фокуса промежуточной зоны. Очевидно, что для крайней зоны положение ножа окажется предфокальным, и на краю зеркала тень разместится справа. Для центральной зоны это же положение ножа окажется зафокальным, и в центре зеркала тень расположится слева от вертикальной оси симметрии (рис.2.2).

На промежуточной зоне, в фокусе которой находится нож, мы увидим “полутень”, когда поверхность гаснет лишь отчасти. Таким образом можно обнаруживать неоднородности на поверхности зеркала.

Вообще говоря, при простом теневом методе мы не получаем на экране оптического объекта; картина наблюдаемая при этом методе во всех случаях является не особо резкой, что объясняется законами геометрической оптики и явлениями дифракции. А.Теплер (1864) в дополнение к методу Фуко с лезвием ножа разработал свой метод с оптическим изображением объекта.

Рассмотрим сначала схему (рис.2.3), в которой источником света служит небольшое отверстие в диафрагме  $L$ . Его изображение с помощью линзы  $K$  проектируется на отверстие во второй диафрагме  $L'$ . Кроме того, объектив  $O$  дает изображение объекта на экране  $P$ . В том случае, если объект не имеет неоднородностей, весь свет, исходящий из отверстия диафрагмы  $L$ , проходит через отверстие диафрагмы  $L'$ . Следовательно, на экране наблюдается равномерное распределение яркости. Однако в том случае, если в какой либо точке объекта произойдет отклонение лучей, они попадут в отверстие диафрагмы  $L'$ , и соответствующие места изображения на экране окажутся темнее. Полное затемнение наступает в том случае, если отклонение лучей в объекте достигает величины  $D/a \leq \varepsilon$ . Если производить наблюдение постепенно изменяя яркость, то заметим, что все места объекта, которые преломляют свет под углом, меньшим  $\varepsilon$ , на экране будут светлыми, те же места, которые отклоняют свет на угол, больший  $\varepsilon$

(безразлично, в каком направлении), оказываются темными. Этот предельный угол можно варьировать выбором диафрагм.



**Рисунок 2.3.** Теневая установка Теплера с круговой диафрагмой

Если речь идет об объекте, содержащем определенные посторонние включения, которые должны быть раскрыты на изображении, то необходимо принимать во внимание дифракцию, что требует более чувствительной установки. Критический угол отклонения  $\varepsilon$  дается отношением  $D/a$ , и чувствительность, следовательно, тем больше, чем меньше  $D$ .

Нерезкость на экране, обусловленная дифракцией, приближенно определяется величиной  $\lambda \cdot b/D$  или, если ее отнести к объекту величиной  $\lambda \cdot a/D$ . Если обозначить через  $d$  соответствующую разрешающую силу установки для этого участка объекта, то должно быть справедливо следующее уравнение  $D/a = \lambda/d$ . Иными словами, критический, еще доступный наблюдаемый угол отклонения определяется только самим объектом, т.е. величиной  $d$  ( $\lambda$  – длина волны применяемого света, считается постоянной). Характеристики прибора, в особенности  $a$ , не играют никакой роли. Это противоречит прежним данным, полученным, в частности, в работах Теплера. С другой стороны, результаты Теплера получены им из опыта. Объяснение этого расхождения может быть следующим: если речь идет о вполне определенном объекте, для которого требуется разрешающая сила  $d$ , то чувствительность этой установки определяется исключительно соотношением  $\lambda/d$ , а фокусное расстояние линзы  $K$  не играет никакой роли (доказано, в частности, Г.Хансенom).

По изображению, полученному описанным методом, в основном можно определить только величину отклонения света, т.е. происходило оно с углом большим или меньшим критического значения. Можно, однако, в диафрагме  $L'$ , кроме центрального отверстия, сделать еще дополнительные отверстия того же диаметра. При сравнении полученных при этом изображений можно определить, какое из отверстий отвечает изображению определенной точки объекта; становится возможным определение как величины, так и направления отклонения. Сравнение результатов между собой можно осуществлять, например, попеременно

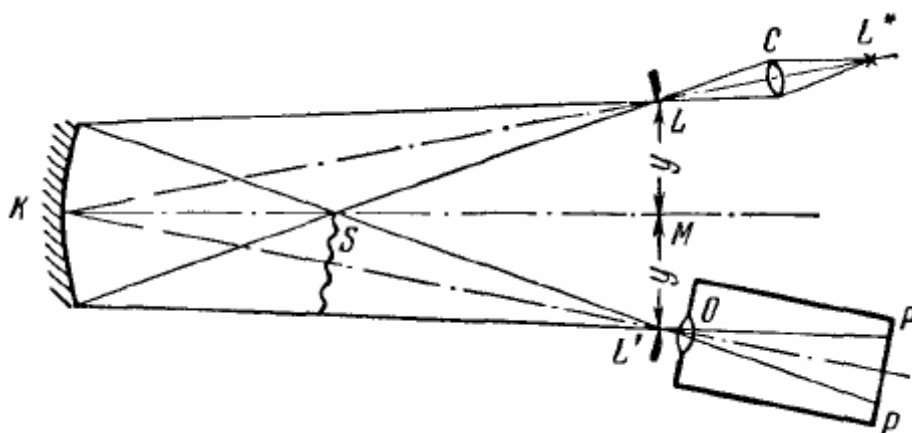
закрывая отдельные отверстия или вводя различные светофильтры. В последнем случае получают на изображении объекта области с различной окраской в зависимости от величины и направления отклонения лучей.

Рассмотрим теперь метод с прямой диафрагмой, т.е. вместо диафрагмы  $L$  с круглым отверстием можно применять диафрагму с прямыми краями; в этом случае, если с помощью диафрагмы  $L'$  выделить световую полоску постоянной ширины, то при нормальных условиях поле на экране будет иметь постоянную яркость. При наличии в объекте точек, где лучи испытывают отклонение в плоскости, вертикальной по отношению к краю  $L'$ , яркость поля соответственно будет изменяться. Она уменьшится, если свет отклонится на край диафрагмы, и наоборот.

В полученном таким образом изображении обнаруживается много ступеней интенсивности. Определенная величина интенсивности соответствует определенному отклонению в направлении, вертикальном к краю диафрагмы; в некоторых случаях этим можно пользоваться для количественной оценки явления. Если падающая на край диафрагмы  $L'$  световая полоска очень узкая, то отклонение света  $\varepsilon$  вызывает относительно большое изменение яркости. В этом случае, однако, предел изменения света в обе стороны различен; отклонение в сторону края диафрагмы быстро дает полное затемнение, отклонение в противоположном направлении практически не ограничивает освещенности.

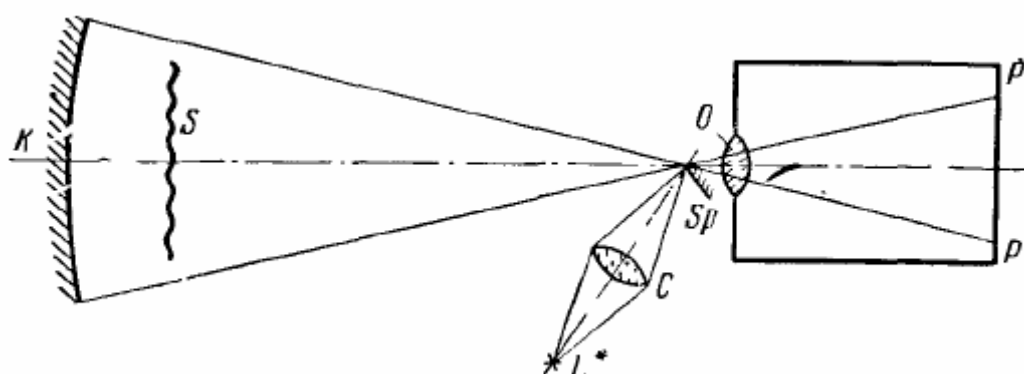
Относительно лабораторно-технологического оформления этого принципа можно сделать следующие основные замечания:

- 1) Если в установке применяется линза  $K$  (рис.2.3), то наиболее пригодным в данном случае является длиннофокусный телескопический объектив, или, по возможности, два одинаковых объектива при симметричном расположении, причем объект должен находиться в прямом пучке света.



**Рисунок 2.4.** Теневая установка Теплера с вогнутым зеркалом.

- 2) Можно применять *вогнутое зеркало*  $K$  согласно схеме, изображенной на рис.2.4, причем диафрагмы  $L$  и  $L'$  следует установить на расстоянии радиуса кривизны вогнутого зеркала, несколько сдвинув их относительно оптической оси.
- 3) В некоторых случаях применяют *метод совмещения* (рис.2.5), при котором диафрагмы  $L$  и  $L'$  устанавливаются непосредственно рядом в центре кривизны вогнутого зеркала. В этом случае *Объект* необходимо располагать очень близко к вогнутому зеркалу во избежание двойного изображения. Световые лучи два раза проходят через *Объект*. Следовательно, чувствительность этого метода повышается.

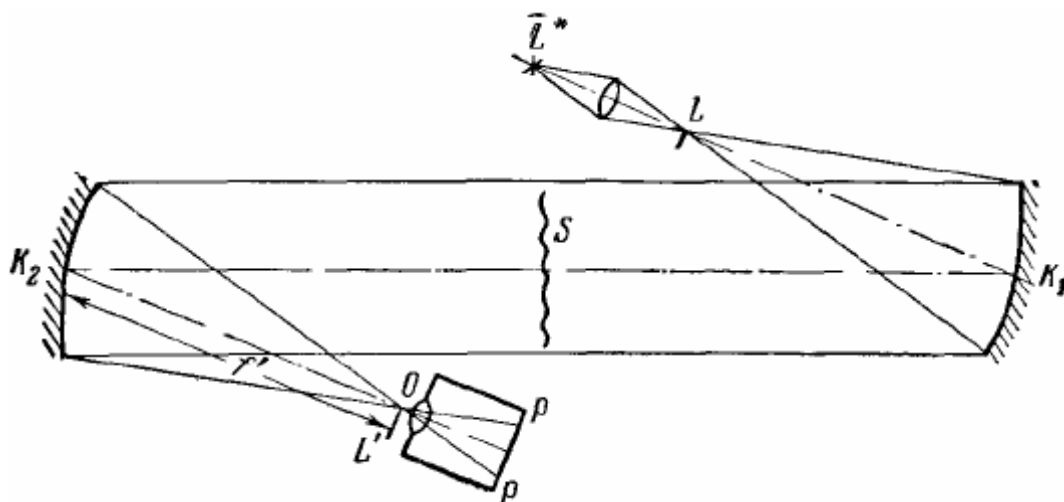


**Рисунок 2.5.** Метод совмещения.

- 4) Если необходимо пометить объект в параллельном пучке лучей, то можно применить два вогнутых зеркала по схеме, представленной на рис.2.6. Вогнутые зеркала следует располагать на весьма значительном расстоянии друг от друга, так что для такой установки требуется большая площадь. Если применять диафрагму с прямолинейным краем, то влияние дифракционных эффектов оказывается значительно более благоприятным, чем в случае диафрагмы с круглым отверстием. Если объект обнаруживает большое количество неоднородностей, для которых надо определить величину  $d$ , то в первом случае получается расширение изображения источника света на краю диафрагмы на величину  $\lambda \cdot a/d$ . Но так как подобная диафрагма ограничивает только одну сторону дифракционных пучков, а другая сторона остается вполне свободной, то при схеме с достаточной резкостью получают еще более мелкие детали объекта. Край диафрагмы  $L'$  не должен быть непременно прямолинейным

Так же можно пользоваться методом дифракционных решеток. Если в точке  $L$  вместо краевой диафрагмы поместить крупную дифракционную решетку, а в точке  $L'$  – решетку, с постоянной, соответствующей размерам

деталей изображения, то подобная установка, как только что было сказано, может значительно повысить яркость изображения. В этом случае один край элементов большой решетки должен играть роль прямолинейных краев диафрагм. Однако величина отклонения не должна быть настолько большой, чтобы на соответствующие лучи света могли оказывать влияние и соседние элементы решетки.



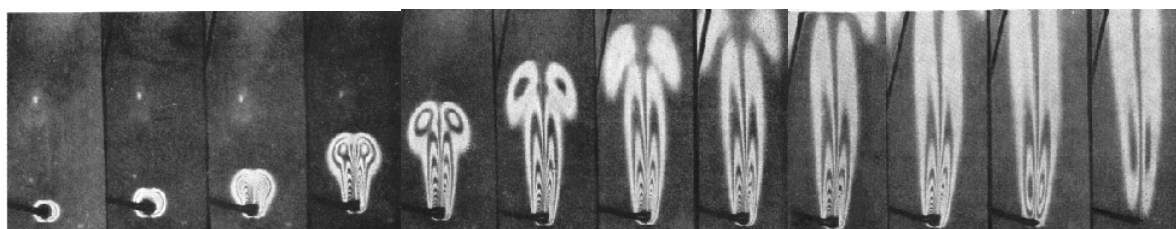
**Рисунок 2.6.** Теневая установка Теплера с двумя вогнутыми зеркалами.

Подобная установка может служить также совершенно иным целям, а именно для количественной оценки отклонения дифракционных лучей на изображении, если построить соответствующую кривую. В этом случае полосы света, получающиеся вследствие изображения решетки  $L$  в плоскости решетки  $L'$ , можно полностью пропустить через щели решетки  $L'$ . Если теперь отклонение будет равно половине постоянной решетки, то соответствующие точки изображения будут темными, если же отклонение точно равно постоянной решетки (перпендикулярно к направлению ее штрихов), то наступит просветление. Для определения порядка величины отклонения можно поступить следующим образом: в  $L$  применяют только одну щель, свет от которой проходит в определенную щель  $L'$ . Остальные щели в  $L'$  снабжены фильтрами различного цвета; вследствие этого кривые постоянного отклонения принимают соответствующий цвет, и порядок отклонения определяется однозначно.

### **Применение теневого метода для наблюдения термогравитационной конвекции.**

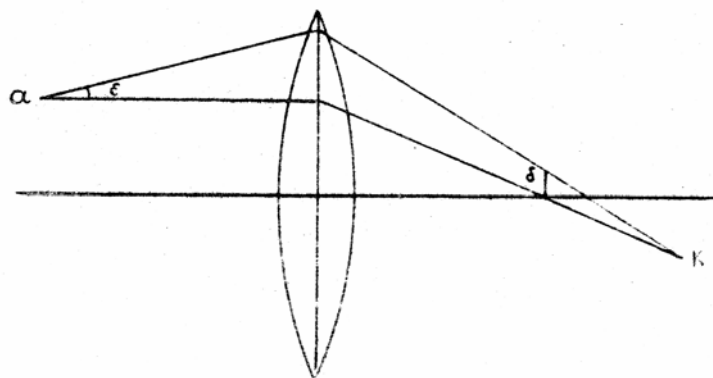
Показатель преломления монохроматического излучения зависит от концентрации активных молекул, но концентрация молекул газа связана с его локальной температурой, а, следовательно, и с градиентом показателя преломления.

Свойство оптических неоднородностей преломлять световой поток было использовано в полутеневом методе, который широко используется в визуализации различных гидродинамических явлений, в том числе и термогравитационной конвекции. При нагревании воздуха его показатель преломления изменяется и таким образом возникает локальная оптическая неоднородность, известная как «свиль» (или «шлира»), которую можно зарегистрировать, используя специальную полутеневую установку. Данный метод регистрации неоднородностей назван методом Тёплера, он позволяет визуализировать процесс естественной конвекции при нагревании предметов любой геометрической формы (рис.2.7).



**Рисунок 2.7.** Картина развития температурных градиентов в трансформаторном масле после включения тока 0,38 А при продолжительности нагрева 90 с. Система представляет собой нить, находящуюся в кювете с трансформаторным маслом [3].

Теневые методы позволяют исследовать прозрачные оптические неоднородности. Как правило, измеряемой величиной при теневых измерениях является угол отклонения световых лучей. На рисунке (рис.2.8) представлена простейшая схема, поясняющая сущность теневых измерений и способ измерения угла отклонения световых лучей в неоднородности с параллельным ходом лучей.



**Рисунок 2.8.** Преломление световых лучей на оптической неоднородности.  $a$  – точка, в которой находится неоднородность,  $\epsilon$  – угол, на который отклоняется луч,  $\delta$  – смещение отклонённого луча в фокальной плоскости объектива,  $к$  – изображение неоднородности.

Показатель преломления монохроматического излучения зависит от концентрации активных молекул  $N$ , но концентрацию можно непрерывно изменять в пространстве, и, таким образом, можно создать градиент показателя преломления. В таком пространстве наблюдаются световые пучки с искривлёнными границами. На чертеже границы искривлённых пучков или их оси изображаются кривыми световыми лучами. Радиус кривизны луча в общем случае изменяется вдоль своего пути. Для каждой точки  $x$  справедливо соотношение:

$$r = \frac{n}{dn/dr}.$$

Здесь  $dn/dr$  есть градиент показателя преломления в точке  $x$ , в направлении, перпендикулярном к лучу.

В атмосферном лучепреломлении поле тяготения Земли участвует лишь косвенно. Оно создаёт совместно с молекулярным тепловым движением градиент плотности газовых молекул и благодаря этому – градиент преломления.

Если оптическая неоднородность смещает параллельный пучок на малый угол  $\varepsilon$ , то в фокальной плоскости объектива луч сдвинется на расстояние  $\delta$ :

$$\delta = f \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \approx f \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние объектива. Смещение луча не зависит от положения неоднородности.

Если градиент показателя преломления имеет только одну составляющую, то связь между углом отклонения и градиентом температур определяется в виде:

$$\varepsilon = \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dx} l, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon$  – угол отклонения луча на неоднородности,  $n_0$  – невозмущённое значение показателя преломления,  $l$  – протяжённость неоднородности в направлении распространения луча.

С учётом температурного коэффициента показателя преломления:

$$\kappa = \frac{dn}{dT} \quad (2.3)$$

зависимость (1.5) получится в виде:

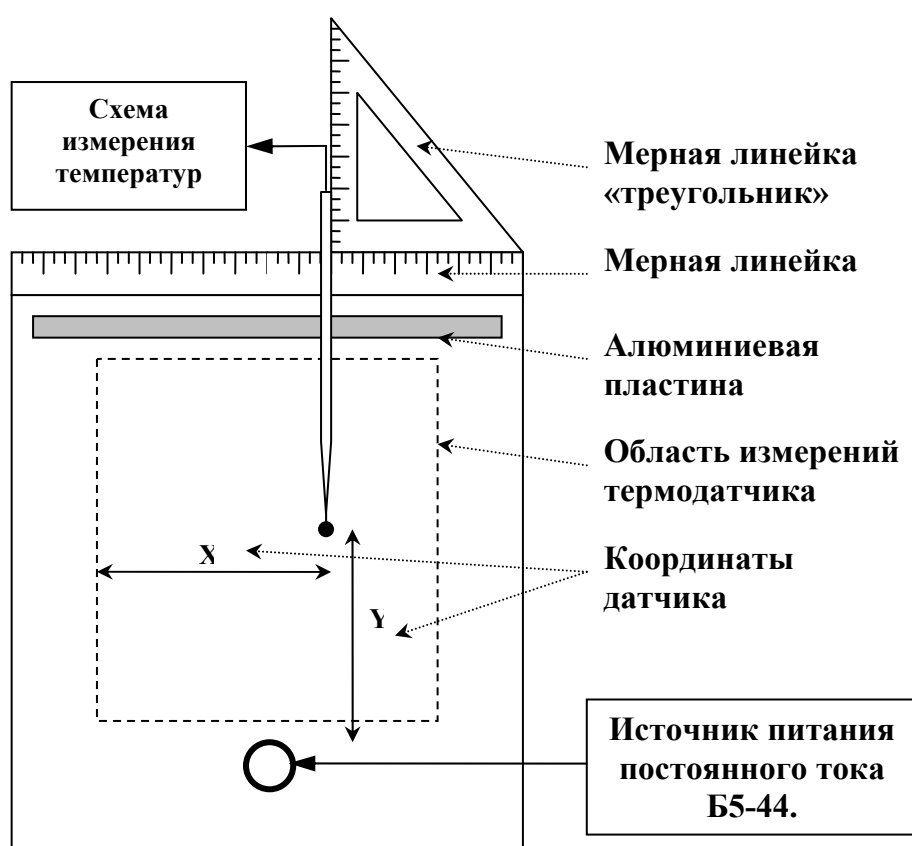


$$\varepsilon = \frac{\kappa}{n_0} \frac{dT}{dx} l. \quad (2.4)$$

Линии равного угла отклонения есть линии постоянного градиента температуры.

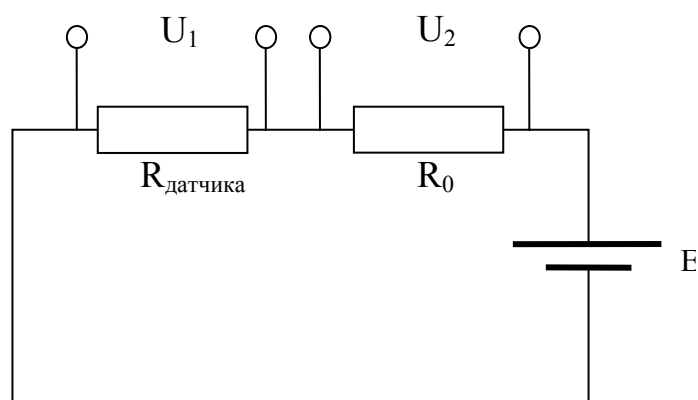
### 3. Описание экспериментальной установки

Для исследования процесса термогравитации использовалась установка, представленная на рис.3.1. В экспериментальной кювете в качестве нагревательного элемента использовалась спираль из нихромовой проволоки. Напряжение на нагревательный элемент подавалось с источника питания постоянного тока Б5-44 (рис.3.1).



**Рисунок 3.1.** Экспериментальная кювета

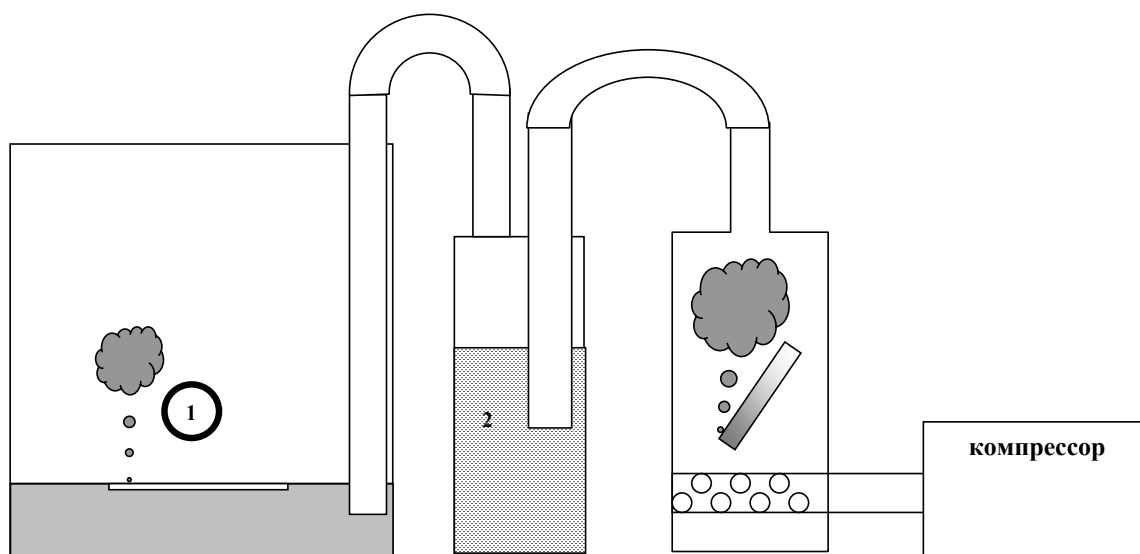
Для измерения температур использовался полупроводниковый датчик Карманова, принцип его работы основан на изменении сопротивления полупроводника при изменении температуры. Датчик включается в измерительную электрическую цепь (рис.3.2). Оптимальное рабочее напряжение подаваемое на датчик составляет доли вольта, поэтому удобно использовать для питания измерительного термосопротивления обычную батарейку (1,5 В) при соотношении сопротивлений  $R_0/R_{\text{датчика}} \approx 0,1$ .



**Рисунок 3.2.** Схема измерения температуры.

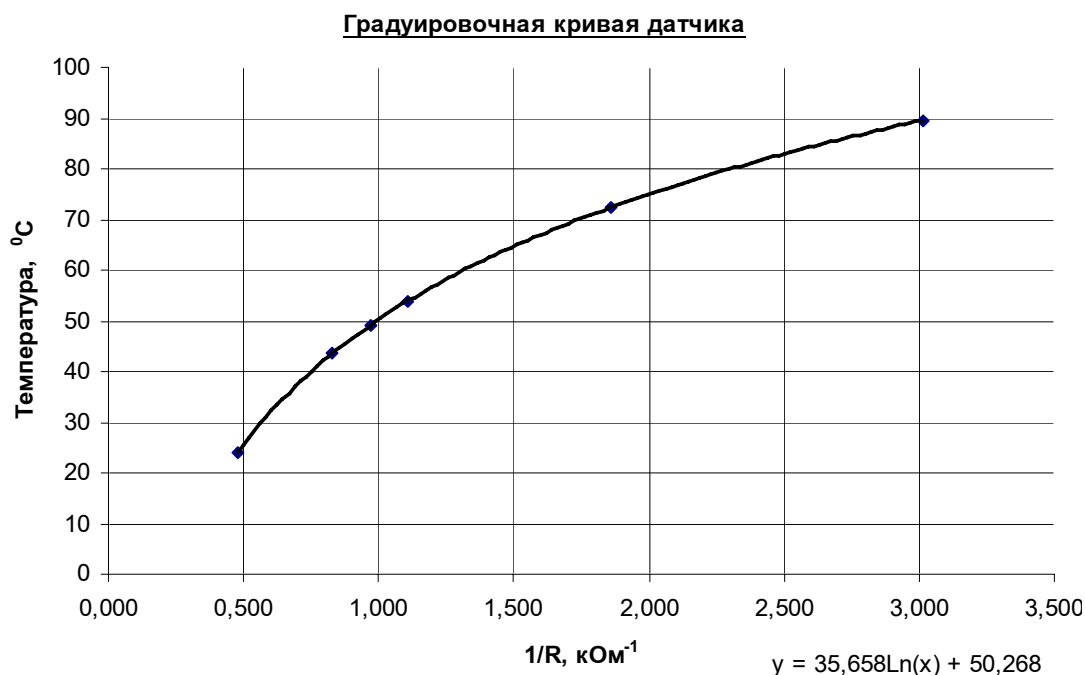
Падение напряжения на каждом сопротивлении записывается с помощью АЦП для дальнейшего вычисления температуры в точке положения датчика.

Для измерения скорости термогравитационного потока в основании кюветы собрана полость с щелью для подачи в кювету дыма (рис.3.3). Дым пропускается через воду для охлаждения до комнатной температуры для того, чтобы движение дыма в кювете было вызвано только термогравитационными потоками от нагревательного элемента.



**Рисунок 3.3.** Система подачи дыма в экспериментальную кювету, 1 – нагревательный элемент, 2 – вода для охлаждения дыма, поступающего в кювету.

Для построения поля температур с помощью датчика Карманова необходимо перед началом измерений провести градуировку измерительной цепи (рис.3.4). Градуировка проводится в резервуаре с водой с помощью лабораторному стеклянному термометру (ГОСТ 16590-71) в диапазоне температур от 20 до 90°C.

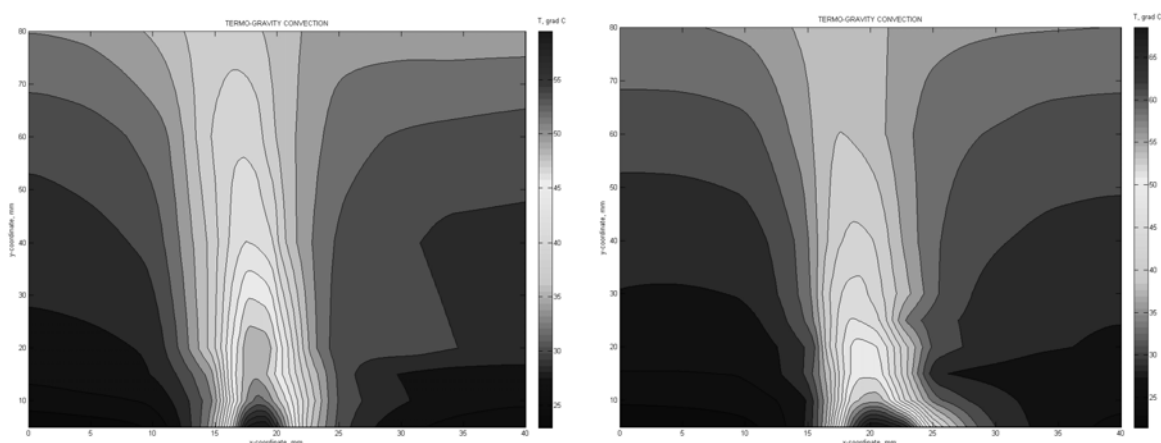


**Рисунок 3.4.** Градуировочная кривая датчика температур.

Для построения поля температур в экспериментальной кювете датчик перемещался вручную по горизонтали и по вертикали. Положения датчика определялись двумя линейками с ценой деления 1 мм.

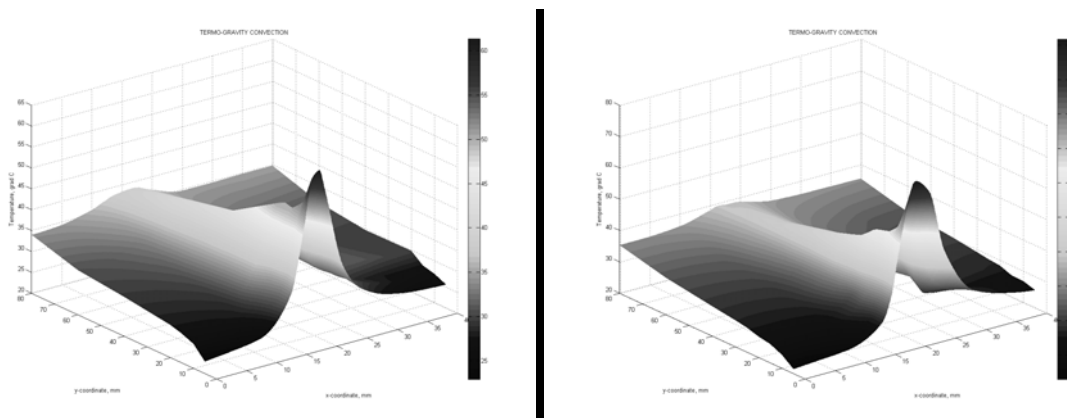
Полученные данные можно обработать в среде *Matlab*, используя несложную программу, которая строит поле скоростей (рис.3.5).

Измерения проводились для различных мощностей выделяемых на нагревателе (2,1 и 2,5 Вт), контурные графики и диаграммные распределения температур представлены на рис.3.4 и рис.3.5, соответственно.



**Рисунок 3.5.** Контурный график распределения температур ( $^{\circ}\text{C}$ ), для разных мощностей: 2,1 Вт (слева) и 2,5 Вт (справа), выделяемых на нагревателе.

Кроме контурных графиков распределения температур можно построить и диаграммы (рис.3.6).

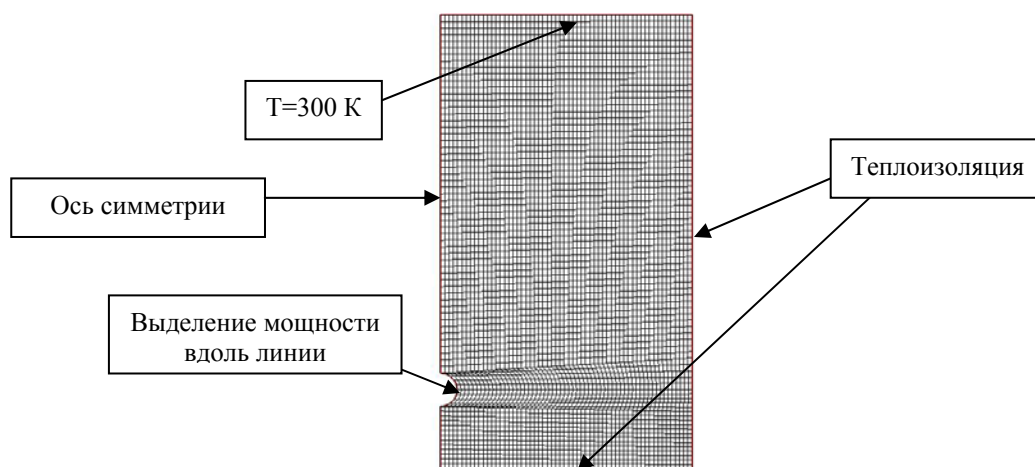


**Рисунок 3.6.** Диаграмма распределения температур для разных мощностей: 2,1 Вт (слева) и 2,5 Вт (справа) выделяемой мощности.

#### 4. Численное моделирование.

##### **Постановка задачи**

Численное моделирование производится в пакете *CFD*, с учётом плоскости симметрии (рис.4.1). Тепло отводится из кюветы через алюминиевую пластину, её температура считается постоянной, на нагревательном элементе выделяется мощность 2,5 Вт и его температура считается постоянной.

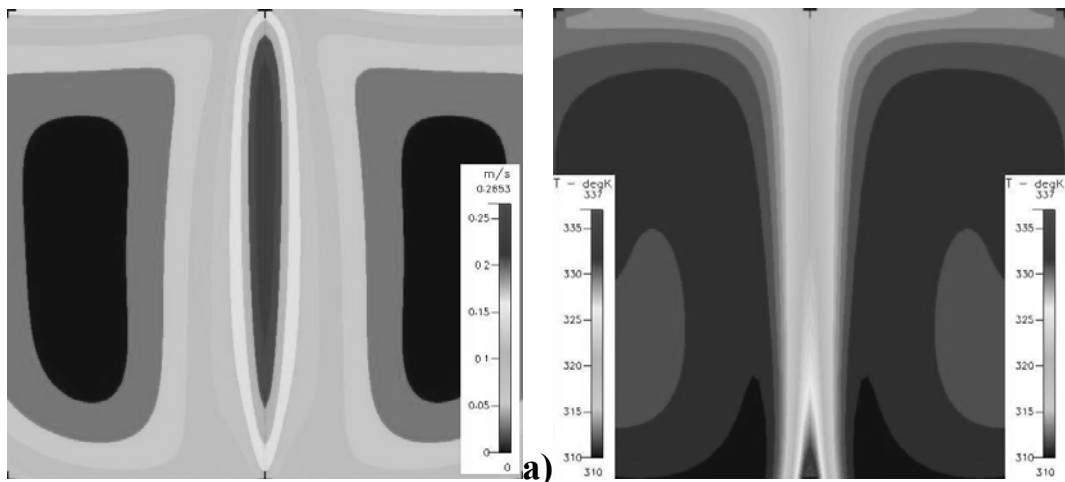


**Рисунок 4.1** Конечноэлементная сетка с граничными условиями.

##### **Результаты моделирования.**

На контурном графике распределения температур хорошо прослеживается центральная струя с практически постоянной

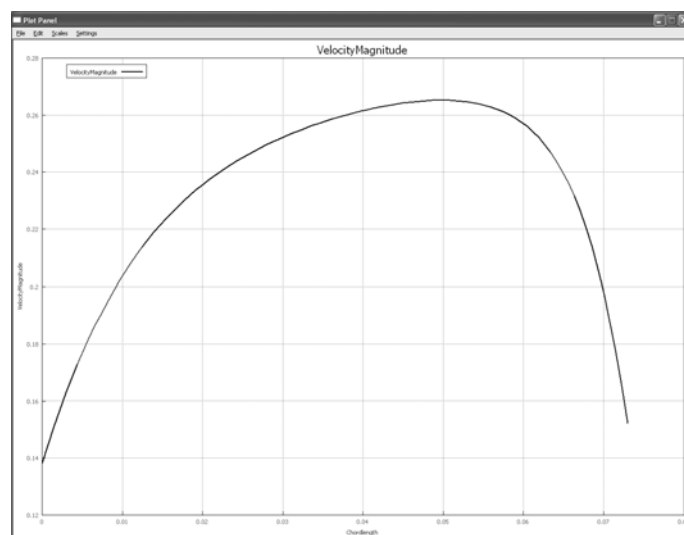
температурой ( $50^{\circ}\text{C}$ ), перед столкновением с пластиной струя растекается, охлаждение происходит в непосредственной близости от пластины.



**Рисунок 4.2.** Контурные графики распределения скоростей (а) и распределения температур (б) в зоне экспериментальных измерений.

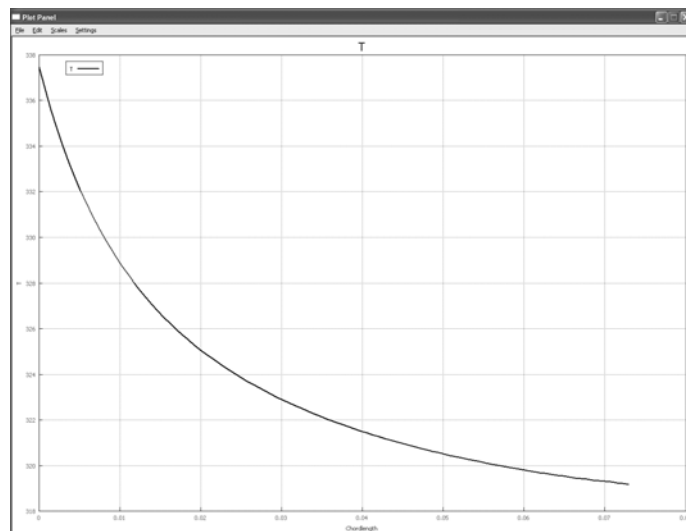
Если мы обратимся к контурному графику распределения скоростей (рис.4.2,а), то отметим, что области постоянной температуры соответствуют зона постоянной скорости и зона торможения струи. Наблюдается аналогия с ЭГД-течениями, но в нашем случае зона разгона существенно больше.

Для более детального анализа рассмотрим графики распределения скорости (рис.4.3) и давления (рис.4.4) вдоль центральной оси.



**Рисунок 4.3.** График распределения скорости вдоль оси, в зоне экспериментальных измерений.

На графике распределения скорости (рис.4.3) отчётливо видна зона ускорения, зона равномерного движения и зона торможения. Но стоит отметить, что они не столь выражены, как в ЭГД-течениях.

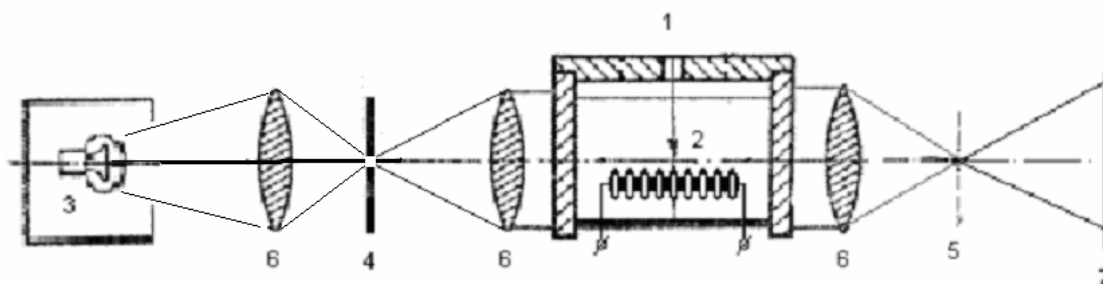


**Рисунок 4.4.** График распределения температур вдоль оси, в зоне экспериментальных данных.

Отметим что в зонах равномерного течения и торможения температура постоянна, с точностью до  $5^{\circ}\text{C}$ .

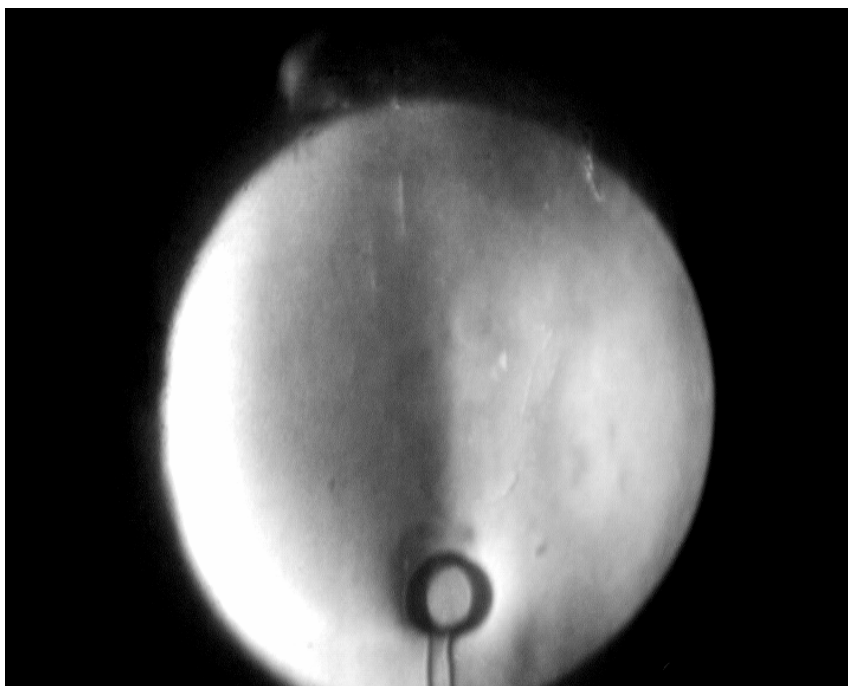
## 5. Установка для исследования процесса естественной конвекции полутеневым методом

Установка для исследования процесса термогравитации, основанная на методе Теплера, представлена на рис.5.1.



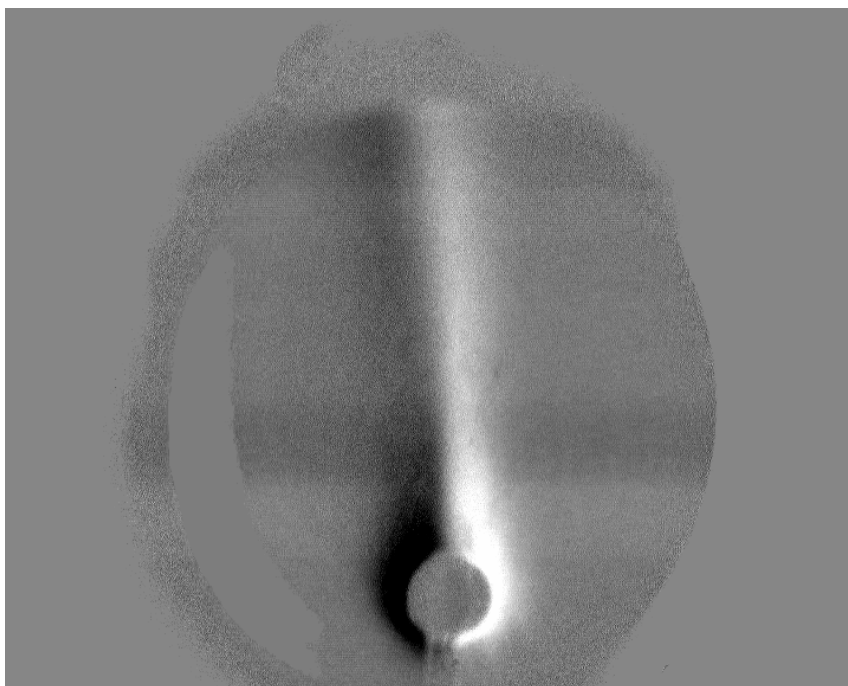
**Рисунок 5.1.** Экспериментальная установка: 1 – кювета, 2 – нагревательный элемент (спираль из нихромовой проволоки), 3 – лампа накала, 4 – экран с диафрагмой, 5 – вертикальный нож Фуко, 6 – собирающие линзы, 7 – экран.

Для получения картины распределения интенсивности используется видеокамера, которая осуществляла съемку картины с экрана (7, рис.5.1).



**Рисунок 5.2.** Изображение термогравитационной конвекции, получаемое на экране (7, рис.1.18).

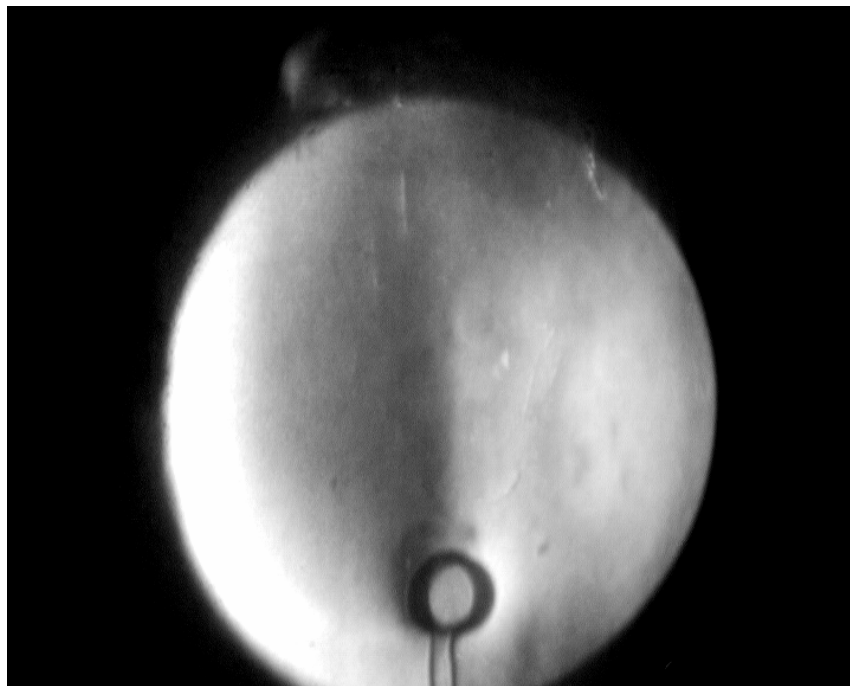
Видно (рис.5.2), что распределение интенсивности освещения заметно слабо. Чтобы увеличить четкость, из полученной картины вычитается картина невозмущенного фона и улучшается контрастность изображения. В результате получается достаточно отчетливое распределение интенсивностей (рис.5.3).



**Рисунок 5.3.** Видеокадр после начальной обработки.

Для регистрации динамики изменения распределений интенсивности света использовалась видеокамера, с помощью которой осуществлялась видеосъемка полутеневой картины с экрана (7, рис.5.1).

На рис.5.4 представлен типичный видеокадр полутеневой картины естественной конвекции при мощности нагрева 2,1 Вт.



**Рисунок 5.4.** Полученный кадр полутеневой картины.

Видно, что от нагревательного элемента, окруженного слоем с резким изменением яркости, слева темнее, справа – светлее, поднимается струя нагретого воздуха, которая на кадре выглядит как вертикальная полутеневая полоска. Отметим, что контрастность полученной картины невелика.

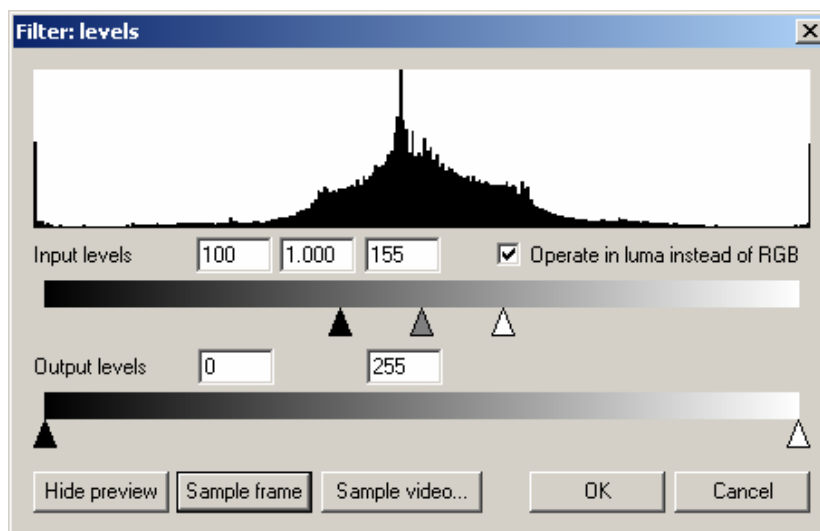
Для увеличения четкости изображения, в программе *VirtualDub* проводится обработка видеоряда. В процессе обработки из полученной картины вычиталась картина невозмущенного фона – кадра, полученного до включения нагревательного элемента, и кроме этого улучшается контрастность изображения.

Для вычитания одного кадра из другого в программе *VirtualDub* реализуется следующая процедура: исходное изображение инвертируется, т.е. преобразовывалось в негативное, после этого на него накладывается изображение невозмущенного фона с прозрачностью 50 %. При такой процедуре происходит попиксельное вычитание одного кадра из другого. Если яркости пикселей одинаковы, то яркость получившегося пикселя становится равной ровно 0,5 относительных единицы, или 127 единиц уровня серого цвета, и этот пиксель, соответственно, будет иметь серый цвет. Если яркости пикселей отличаются, то полученный пиксель будет



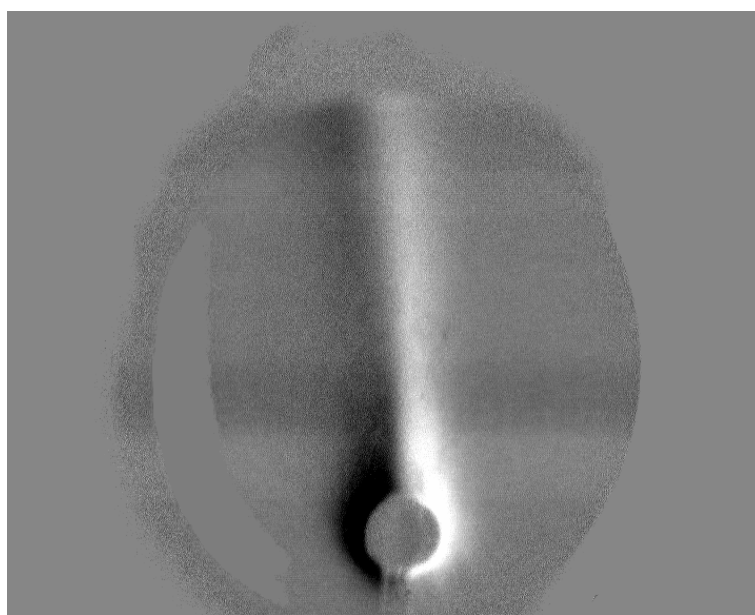
иметь яркость отличную от 0,5, и он будет иметь более светлый, или более тёмный оттенок.

Улучшение контрастности в программе *VirtualDub* задаётся командой *levels* в настройках фильтра видеоизображения (рис.5.5). В открывшемся окне строится гистограмма исходного изображения (кнопка *Sample frame*), и задаются границы яркости исходного изображения (*Input levels*), которые автоматически «растягиваются» на весь диапазон яркости от 0 до 1 (или от 0 до 255 для уровней градации серого цвета)



**Рисунок 5.5.** Окно фильтра *levels* для выравнивания уровня контрастности исходного изображения в программе *VirtualDub*.

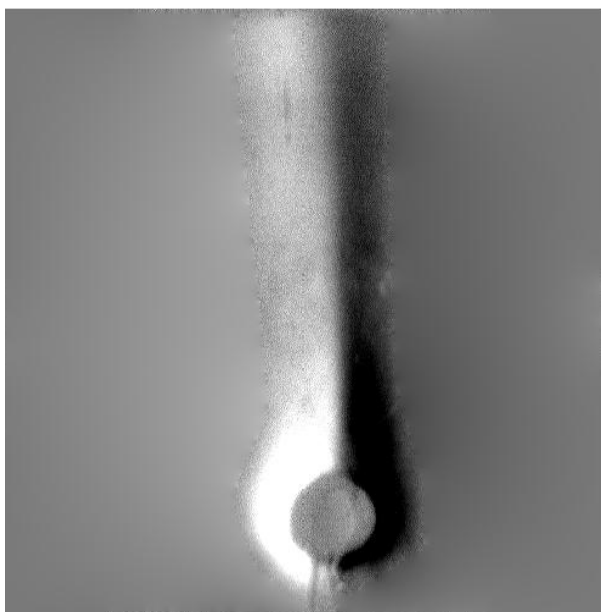
В результате обработки получается уже вполне отчетливое распределение интенсивностей (рис.5.6).



**Рисунок 5.6.** Видеокадр после предварительной обработки.

Видно, что после обработки изображения стала заметна шумовая помеха в виде чередующихся горизонтальных полос на кадрах видеоряда. Анализ временных характеристик помехи показывает, что это 50-ти герцовая наводка.

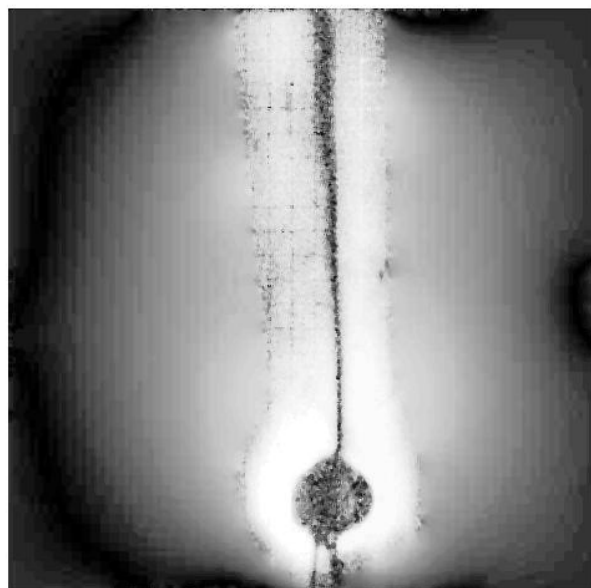
С помощью пакета программ *Matlab* (The MathWorks, Inc.) и предусмотренных в нем пакетов по обработке изображений, в частности используя сглаживание исходного изображения по вертикальным отрезкам, удастся заметно снизить уровень шумов-помех (рис.5.7). Однако полностью избавиться от наводки не удастся – это будет видно дальше.



**Рисунок 5.7.** Кадр после «удаления» шумов.

Отметим, что в эксперименте был использован вертикальный нож Фуко, поэтому одна половина изображения струи, имеет более темные тона, другая половина – светлые.

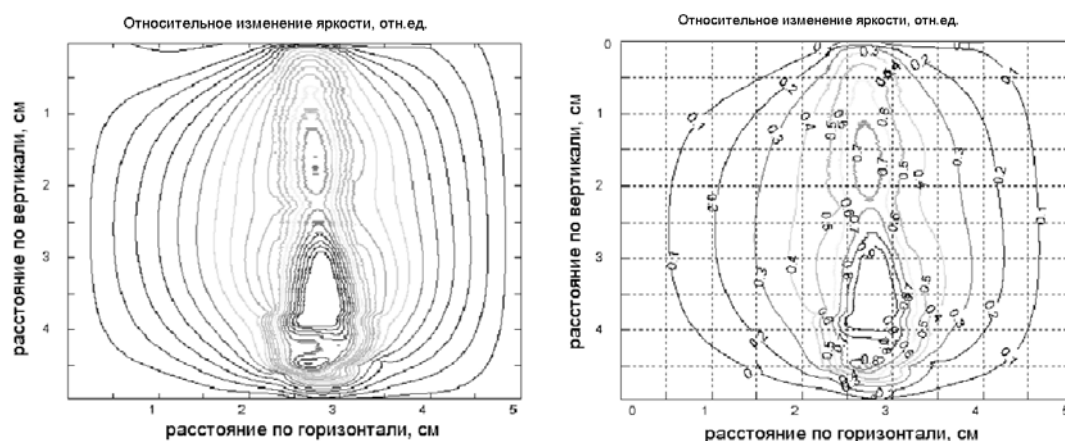
Следующим этапом обработки получаемых изображений является восстановление численных значений показателя преломления среды и, соответственно, температуры. Для этого имеющееся изображение преобразовывается в матрицу относительного изменения яркости изображения в пакете программ *Matlab* (The MathWorks, Inc.). Для этого вычисляется модуль разницы значения яркости каждого пикселя и среднего значения яркости изображения, после чего вновь улучшается контрастность изображения (рис.5.8). Более яркие (светлые) участки изображения соответствуют участкам с большим изменением освещённости исходного изображения.



**Рисунок 5.8.** Относительное изменение яркости исходного изображения полутеневой картинке. Более яркие (светлые) участки соответствуют большему изменению освещённости исходного изображения.

Видно, что на полученном изображении наблюдается тонкая тёмная полоса, которая соответствует центральной части струи тёплого воздуха с нулевым горизонтальным градиентом температуры.

Полученное изображение относительного изменения яркости изображения можно представить в контурном виде (рис.5.9) График представлен в относительных единицах: уровень «0» соответствует минимальному значению изменения яркости изображения, «1» – максимальному.



**Рисунок 5.9.** Контурный график распределения относительного изменения интенсивности освещения экрана в полутеневой установке при свободной тепловой конвекции. Слева представлены 16 уровней яркости, справа – 10.

В нашей установке рассматривалась полутеневая картина, полученная с помощью вертикального ножа Фуко, поэтому у нас на

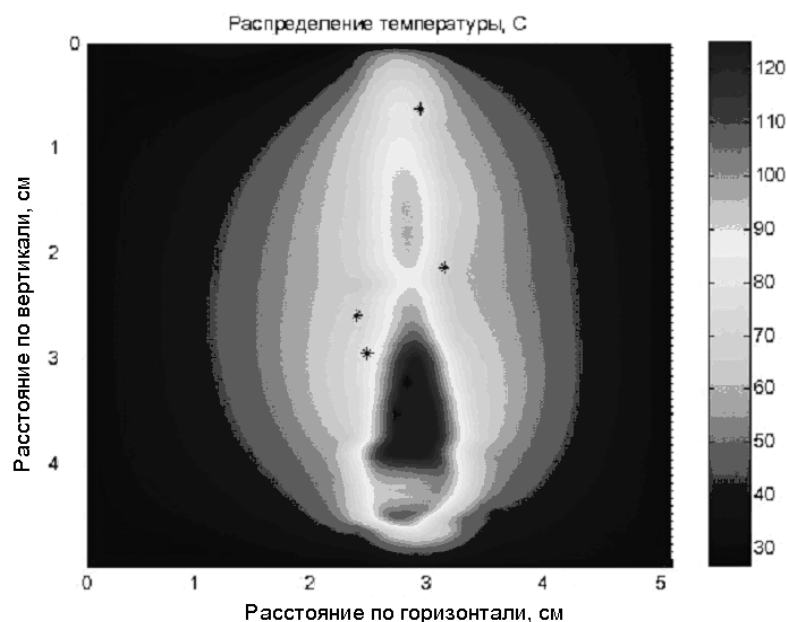
изображении наблюдается изменение яркости освещения экрана. Из представленных формул (2.1 – 2.2) следует, что на тех участках полутеневого изображения, на которых наблюдается максимальное изменение яркости, имеет место максимальный градиент температуры.

Поскольку изменение яркости невелико, естественно предположить в качестве первого приближения линейную зависимость изменения яркости изображения от градиента температуры, т.е.  $I \sim dn/dx \sim dT/dx$ . Используя это предположение можно рассчитать графики распределения показателя преломления а следовательно и температуры.

Как видно из рис. 5.8 вне тепловой струи, в основной части кюветы Для интерпретации этих результатов и получения распределения температур с помощью термопары измеряется температура в непосредственно близости от нагревателя. На краях картины температура считается комнатной, потому что спад температуры поперек струи достаточно силен (струя очень тонкая). Таким образом, зная распределение показателя преломления, с помощью следующей формулы:

$$n = 1 + \frac{\alpha}{T},$$

где  $\alpha = 8,6 \cdot 10^{-2}$  К, которая в первом приближении достаточно точно описывает зависимость коэффициента преломления воздуха от температуры  $n(T)$ , можно восстановить распределение температур в экспериментальной кювете (рис.5.10).



**Рисунок 5.10.** *Распределение температуры над нагревательным элементом. Звёздочками отмечены места контрольного измерения температуры.*

Для проверки полученных результатов, с помощью термопары можно измерить температуру в нескольких точках, как это показано на графике распределения температур (рис.5.10) звёздочками (\*).

Результаты измерения температуры с помощью термопары и расчёта по видеоизображению представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Интерпретация результатов (Matlab), °C	Эксперимент (термопара), °C	Разница температур, °C	Разница температур, %
125	111	14	12
66	50	16	27
74	61	13	19
125	117	8	7
71	57	14	22
66	50	16	27

Видно, что значения температуры, восстановленные по полутеневой картинке, больше, чем измеренные с помощью термопары. Для всех измеренных температур разница составляет примерно 15<sup>0</sup>С.

## 6. Задание на предварительную подготовку

- Рассчитать в CFD поле температур в экспериментальной кювете для мощности 2,5 Вт выделяемой на нагревательном элементе.

- Оценить скорость потока нагреваемого воздуха.

## 7. Задание на проведение работы

1. Получить распределение температуры в экспериментальной кювете для  $2 \div 3$  величин выделяемой мощности.
2. Получить картину термогравитационного конвективного потока с помощью полутеневого метода Тёплера.
3. По полученной полутеневой картине восстановить распределение температур в экспериментальной кювете.
4. Провести подробный анализ полученных результатов.

## 8. Порядок проведения экспериментов

1. Подготовить установку для проведения эксперимента. Для этого:
  - 1.1. Включить для прогрева контрольно-измерительные приборы
  - 1.2. Включить компьютер. Подключить компьютер к лабораторной установке
  - 1.3. Включить подсветку кюветы. Для этого:
    - 1.3.1. проверить подключение светодиода к задающему генератору,
    - 1.3.2. установить необходимую частоту подсветки (50 Гц),
    - 1.3.3. подать напряжение на диод (не более 4 В),
    - 1.3.4. проверить, что пучок света высвечивает нужное пространство в экспериментальном сосуде. Это достаточно просто сделать, посмотрев на нагревательный элемент.
    - 1.3.5. Если настройки системы подсветки Вас не устроили, то можно их исправить, перемещая светодиод. Необходимо добиться того, чтобы кювета освещалась узким (пара миллиметров) пучком света.
  - 1.4. Включить видеокамеру. Настроить её так, чтобы на экране был виден нагревательный элемент (рис.5.2).
  - 1.5. Включить источник питания нагревательного элемента. Установить необходимые параметры, например, напряжение питания 10 В.
  - 1.6. Измерить ток, протекающий в цепи нагревательного элемента и рассчитать выделяемую нагревательным элементом мощность.
  - 1.7. Включить программу *l-comp (L-card)* или программу ***L-card-explorer 5***, написанную с участием студентов направления «Прикладные математика и физика» физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета,
2. Измерить распределение температуры в экспериментальной кювете. Для этого:
  - 2.1. Установить нужную высоту измерителя температуры,
  - 2.2. Установить измеритель температуры в некотором положении по горизонтали,

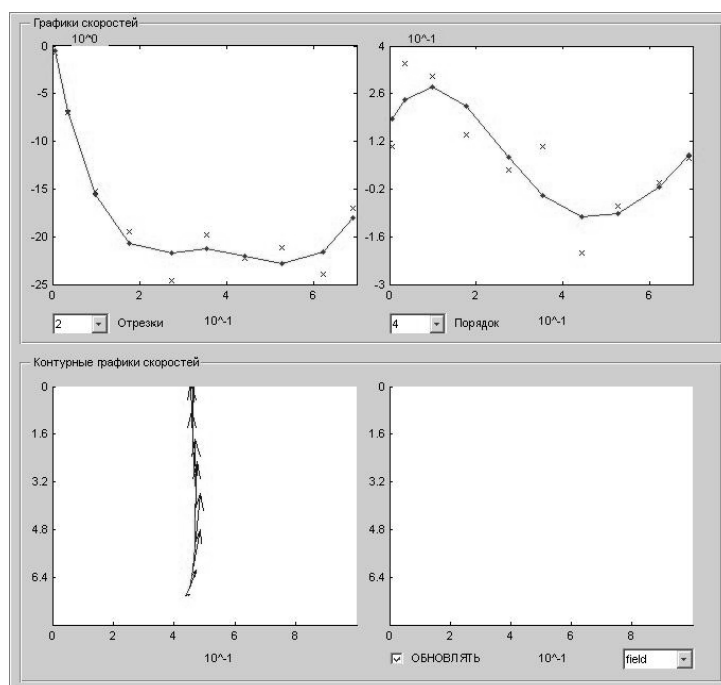
- 2.3. Выждать  $5 \div 10$  секунд, необходимых для установления стационарного режима измерителя температуры,
- 2.4. Записать электрические параметры в компьютер для последующей обработки,
- 2.5. Переместить измеритель температуры по горизонтали на некоторое расстояние, например на  $2 \div 5$  мм, и повторить пункты 2.1  $\div$  2.4,
- 2.6. После записи электрических параметров по горизонтали переместить измеритель на некоторое расстояние по вертикали, например на 5 мм, и получить распределение по горизонтали для этого уровня. Заметим, что для удобства обработки можно для каждого уровня высоты измерителя температуры измерения температуры можно производить в одних и тех же положениях по горизонтали.
- 2.7. Полученные таким образом параметры необходимо обработать и получить распределение температуры в экспериментальной кювете для разных значений выделяемой мощности.
3. Измерить скорость термогравитационного потока воздуха. Для этого:
  - 3.1. Установить необходимый уровень мощности, выделяемой на нагревательном элементе,
  - 3.2. Выждать  $1 \div 2$  минуты до установления термогравитационного потока,
  - 3.3. Включить видеокамеру на запись видеосигнала,
  - 3.4. Включить генератор дыма: поджечь прессованные опилки, включить компрессор. Охлаждённый водой дым начнёт поступать в экспериментальную кювету.
  - 3.5. Записать процесс протекания дыма от нагревательного элемента до верхней границы.
  - 3.6. Отключить генератор дыма, выключив компрессор,
4. Получить картину термогравитационного конвективного потока с помощью полутеневого метода Тёплера. Для этого:
  - 4.1. Включить источник света в экспериментальной установке,
  - 4.2. Проверить настройку оптической системы. Особое внимание следует уделить правильному расположению ножа Фуко,
  - 4.3. Сфотографировать изображение, получаемое на экране, для дальнейшего использования при обработке результатов эксперимента,
  - 4.4. Включить запись видеосигнала,
  - 4.5. Включить питание нагревательного элемента,
  - 4.6. При выходе процесса на стационар остановить видеозапись,
  - 4.7. Выключить установку.

## 9. Обработка экспериментальных результатов

Для получения картины распределения температуры в экспериментальной кювете полученные электрические параметры (напряжение на термосопротивлении и на опорном сопротивлении) для каждого положения измерителя с помощью градуировочной кривой (рис.3.4) пересчитываются в значения температуры. После этого можно построить контурный график (рис.3.5).

Для определения скорости термогравитационного потока можно выделить кадры движения струи теплого воздуха записанного при помощи сгусков дыма или частиц талька для дальнейшей обработки с помощью специальной программы *EGD-reader* [7] (рис.9.1).

В экспериментах наблюдается характерная картина для скорости вдоль оси: зона разгона, зона постоянства скорости, зона торможения.



**Рисунок 9.1.** Обработка видео съёмки струи тепловой конвекции. Справа сверху – распределение вертикальной компоненты скорости, слева снизу – экспериментальные точки и восстановленная линия тока, справа сверху – распределение поперечной компоненты скорости.

## 10. Контрольные вопросы

1. Приведите примеры естественной конвекции.
2. Как определить отводимую от нагревателя мощность в случае естественной конвекции.
3. Что можно исследовать полутеневым методом.
4. Что является движущей силой в тепловой конвекции.



## 11. Рекомендуемая литература.

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика: Гидродинамика, т.6 М.: Наука, 1986
2. Л.Прандтль. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «РХД», 2000
3. В.Н.Полежаев., А.В.Бунэ, Н.А.Верезуб. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнения Навье-Стокса. М.: Наука. 1987
4. Е.Ангелер «Техника физического эксперимента» FML 1962
5. Г.А. Остроумов «Свободная конвекция в условиях внутренней задачи» Москва 1952
6. Р.В.Поль «Введение в оптику» Москва 1947
7. Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Николаев П.О., Стишков Ю.К. Полуавтоматический метод компьютерной обработки поля скоростей ЭГД-течений, Электронная обработка материалов, 2007, № 1, с.24-30.

### Приложение:

Используемые программные продукты:

- *L-graf*
- *L-card-explorer 5*
- *VirtualDub*
- *EGD-reader*

## Лабораторная работа №2

### Интенсификация теплоотвода от нагреваемого тела при помощи электрического ветра

Работа направлена на исследование одной из фундаментальных проблемы электрофизики газов – взаимодействия электрических и гидродинамических полей, связанное с исследованиями потерь газом под воздействием внешнего электрического поля, электронейтральности, устойчивости гидростатического равновесия и возникновения вследствие этого электрического ветра, коренным образом меняющих картину процессов переноса тепла, массы и электричества.

#### 1. Цель работы

1. Провести экспериментальное исследование влияния коронного разряда и электрического ветра в воздухе на интенсификацию процесса теплоотвода от нагреваемого твердого тела в системе электродов игла-кольцо при различных напряжениях.
2. Получить вольтамперную характеристику коронного разряда в системе электродов игла–кольцо и зарегистрировать линии тока электрического ветра в этой системе.
3. Определить коэффициент конвективного теплоотвода от нагреваемого твердого тела без электрического ветра и с ним при различных напряжениях.
4. Сравнить результаты и определить влияние электрического ветра на теплоотвод от нагреваемого тела.

#### 2. Предварительные сведения

##### *Электрический ветер в газах.*

Литература об электрическом ветре имеет давнюю историю, характеризующуюся взлетами и спадами [12]. Например, в конце 19 в. «электрическое истечение» в газах привлекло внимание многих исследователей в связи с вопросом о носителях электрических зарядов: было известно, что газы — непроводники, значит, в них нет носителей зарядов, а истечение электричества с игольчатых электродов осуществляется через газ – что же переносит заряды в этом случае?

Леман в 1897 г. описал форму струек тока конвекции, наблюдаемых при стратифицированном газовом разряде в разрядной трубке. Большой интерес вызвала опубликованная тогда же статья Аррениуса. Этот ученый подверг экспериментальному исследованию механическую реакцию стекающего с игольчатого электрода ветра.

Среди старых работ по электрическому истечению можно отметить статью Зивекинга. Она посвящена экспериментальному исследованию направления истечения электричества. Против коронирующего острия располагались несколько заземленных металлических ламелей, причем можно было порознь измерять ток, текущий на каждую ламель. Автор ограничился констатацией обширного эмпирического материала. В работе Хейзера и Кунце, стыкующейся с работой Зивекинга, приведены результаты измерений распределения плотности тока короны от игольчато-стержневого электрода на разные участки сферического противоэлектрода. В центре этой сферы укреплено коронирующее острие. Противоэлектрод состоит из проволочных колец, имитирующих параллели земного глобуса. Каждое кольцо поочередно подключается к «земле» через гальванометр при остальных заземленных кольцах. Показания гальванометра, поделённые на боковую поверхность эквивалентного шарового слоя соответствующего кольца, характеризуют среднюю плотность коронного тока под заданным полярным углом к продолжению оси игольчатого электрода. Оказалось, что распределение плотности тока приблизительно равномерно по поверхности полусферы, противоположающей коронирующему острию. Высказывается предположение, что хотя объемный заряд – носитель тока, и заполняет всю полусферу, обеспечивая измерявшуюся плотность тока, тем не менее, движение воздуха обусловлено, в основном, осевой равнодействующей всех ponderomotorных сил электрической природы. Эта равнодействующая гонит воздух на всем протяжении полярной оси от коронирующего острия до полюса секционированного и пронизываемого противоэлектрода.

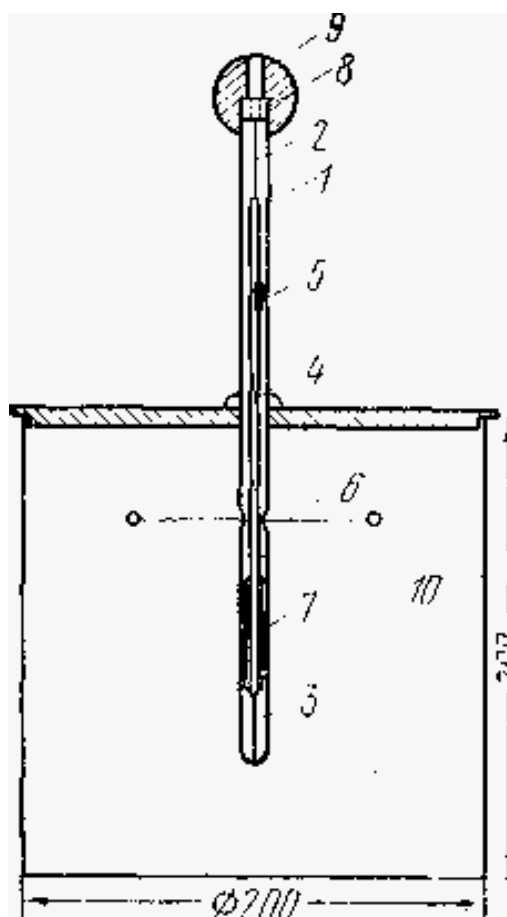
К описанному явлению примыкает явление, обнаруженное при поисках специального вида конвекции – электротермической. Здесь исследовались полутеневым методом потоки горячего воздуха около неподвижного горизонтального раскалённого и наэлектризованного провода. Оказалось, что спокойный ламинарный восходящий факел горячего воздуха скачком переходит в сложное и нестационарное энергичное движение при таком напряжении на проводе относительно окружающего электрода, которое тем выше, чем ниже температура провода. Первоначально предполагалось, что причина кроется в уменьшении диэлектрической проницаемости воздуха по мере повышения его температуры, но оно не оправдалось. Причиной оказалась возникавшая на проводе электрическая корона. При ней ветровой поток воздуха омывает неподвижный провод в случайном поперечном направлении, а движущийся – только спереди.

Оценивая другие, подчас очень интересные, опубликованные работы по коронному разряду, можно установить, что в них явление короны обсуждается с позиций электроники, но не гидродинамики. Правда, некоторые авторы, видимо, тяготясь односторонностью подхода к

сложному явлению и, в то же время, уклоняясь от разбора гидродинамической стороны проблемы, исследуют импульсную корону, возникающую при чрезвычайно кратковременных импульсах напряжения, когда все сопутствующие явления развиваются столь быстро, что инерция газа «не может быть преодолена» и гидродинамическая сторона явления «не успевает» проявиться, так что остается и изучается только его «электронная» сторона. Это, конечно, верно, но это уже и не «корона».

В книге Рубашова и Бортникова [14] кратко сформулирована и проанализирована соответствующая задача математической физики, особое внимание обоснованно уделено одномерным течениям, а также идее обратимости ЭГД-устройств: насос-генератор, приведены описания и расчеты некоторых ЭГД-аппаратов.

Из этого обзора видно, что хотя электрическому ветру в газах, особенно в воздухе, уделялось неизмеримо большее внимание, чем электрическому ветру в жидкостях, тем не менее, гидродинамическая картина явлений не обладает достаточной полнотой.

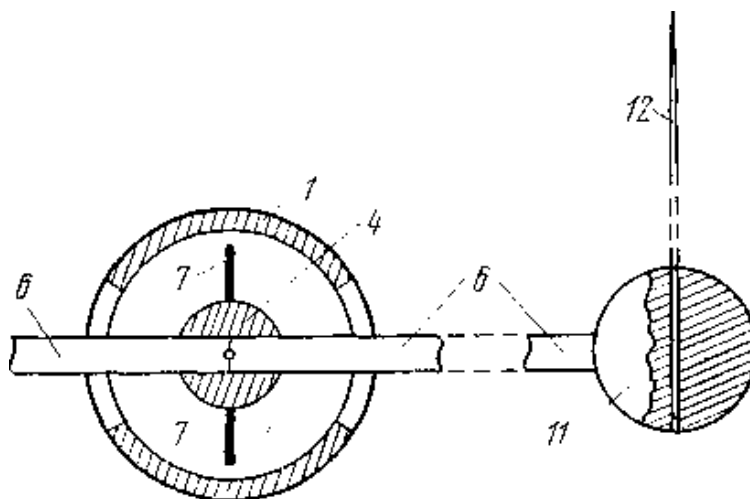


*Рисунок 2.1. Крутильные весы.*

Г.А. Остроумовым были предприняты новые опыты по обнаружению и исследованию явлений, в том числе гидромеханических, сопровождающих корону в воздухе на игольчатом электроде. В частности,

было проведено экспериментальное, на основе крутильных весов Аррениуса, исследование. Крутильные весы [12] имеют солидную конструкцию (рис.2.1) и состоят из латунной трубки (1) диаметром 10/12 мм и длиной 300 мм, внутри которой на вольфрамовых проводах-растяжках (2) и (3) подвешен латунный стержень (4), снабженный отсчетным зеркалом (5), коромыслом (6) и крыльчаткой (7), задемпфированной в масле. В верхней части трубки укреплено натяжное устройство (8), покрытое противокоронным шаром (9).

В вертикальном канале этого шара на трении закрепляется провод от высоковольтного выпрямителя. На концах медного коромысла (рис.2.2) сформированы шарики диаметром 4 мм. Шарики просверлены, и в отверстие одного шарика (11) вставлена испытуемая игла (12). Второй шарик является противовесом. Трубка (1) укреплена в центре крышки из оргстекла, покрывающей жестяной бак (10, рис.2.1) диаметром 200 мм и высотой 200 мм. Бак заземлен через микроамперметр. Противоположный провод от выпрямителя также заземлен. Подаваемое напряжение измеряется статическим вольтметром G-96. Для измерения угла закручивания использован оптический отсчет: 1 мм шкалы, отстоящей от зеркала (5) на 285 мм, соответствует силе реакции электрического ветра в 0,23 дин. В опытах были по очереди испытаны четыре иглы с радиусами кривизны острия 28, 31, 33 и 281 мкм.



**Рисунок 2.2.** Подвижная часть крутильных весов в горизонтальном разрезе.

Проведенные опыты показали отличную воспроизводимость. Сила реакции ветра  $F$  оказалась линейной функцией от квадрата приложенного напряжения (здесь и далее используются СГСЭ-единицы без специального обозначения)

$$F = a (V^2 - V_0^2) > 0; 3 < V < 5C. \quad (2.1)$$

Значение безразмерного параметра  $a$  оказалось не зависящим от знака заряда и степени заострения иглы. В среднем,  $a = 0,030 \pm 0,001$ . Пороговое напряжение  $V_0$  растет нелинейно по мере увеличения радиуса кривизны острия.

Измеренная сила реакции электрического ветра очень точно описывается такой степенной зависимостью от силы коронного тока:

$$F_+ = 8,15 \cdot 10^4 \cdot I^{0,84}, \quad F_- = 2,88 \cdot 10^4 \cdot I^{0,80}, \\ I > 0 \text{ при } V > V_0; \quad 0,80 = 4/5; \quad 0,84 \approx 5/6.$$

Таким образом, в этой серии опытов с крутильными весами были тщательно повторены измерения Аррениуса, но с аппаратом более солидной конструкции, силы реакции протарированы, подтверждена отличная воспроизводимость, установлена весьма точная линейная зависимость силы реакции от квадрата приложенного напряжения и обнаружена отчетливая степенная зависимость силы реакции от силы коронного тока в пределах указанного в (2.1) диапазона напряжений.

### ***Данные экспериментального исследования поля скоростей электрического ветра в воздухе [9,10].***

В системе электродов провод между плоскостями (рис.2.3) линии тока электрического ветра направлены от провода к плоскости и замыкается через периферийные участки поля. Такой характер электрического ветра согласуется с распределением напряженности и плотности объемного заряда, которые максимальны в центральном сечении, проходящем через провод, и быстро убывают при удалении от центрального сечения. Сила, действующая на объемный заряд в промежутке, равна:

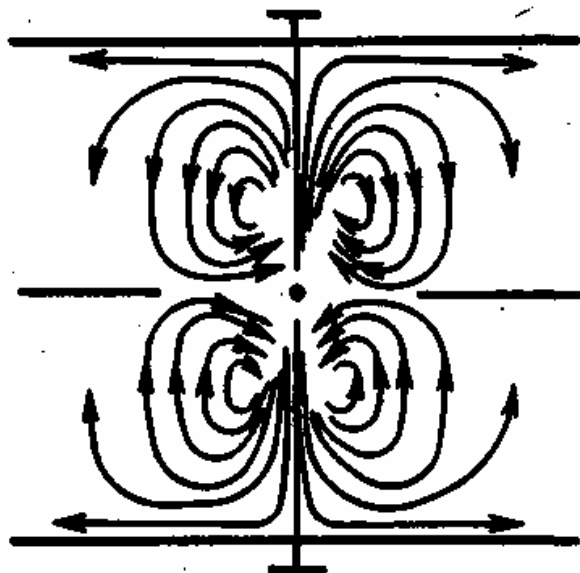
$$F = E \cdot \rho,$$

где  $\rho$  – плотность объемного заряда.

Поскольку скорость движения ионов в воздухе много меньше соответствующей скорости ионов в вакууме, практически вся энергия, получаемая ионами в поле, передается в результате соударений молекулам воздуха. Сила, действующая на объемный заряд, по существу является силой, действующей на среду.

Электрический ветер как физическое явление известен давно, однако возникают трудности экспериментального исследования (так как возможно использование только специальных методов бесконтактного измерения местной скорости потока) и теоретического анализа (поскольку в гидродинамике решение аналогичных или близких по сложности задач отсутствует). Такие возможности появились в последнее время в связи с

разработкой методов измерения скорости движения частиц размером менее 1 мкм в поле коронного разряда. Скорость движения таких частиц определяется электрическим ветром, поскольку составляющей скорости, обусловленной полем, можно пренебречь из-за ее малости. Измерение скорости частиц производится методом съемки траекторий в малом объеме или с помощью доплеровского измерителя скорости.

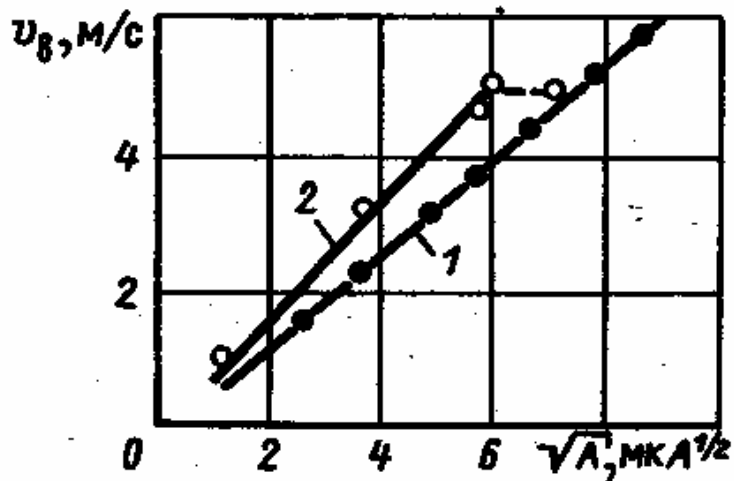


*Рисунок 2.3. Распределение потоков электрического ветра в системе электродов провод между параллельными плоскостями*

Нерегулярный характер электрического ветра в значительной степени связан с нестабильностью коронного разряда. Время установления ветра при межэлектродном расстоянии 100—150 мм составляет примерно 1с.

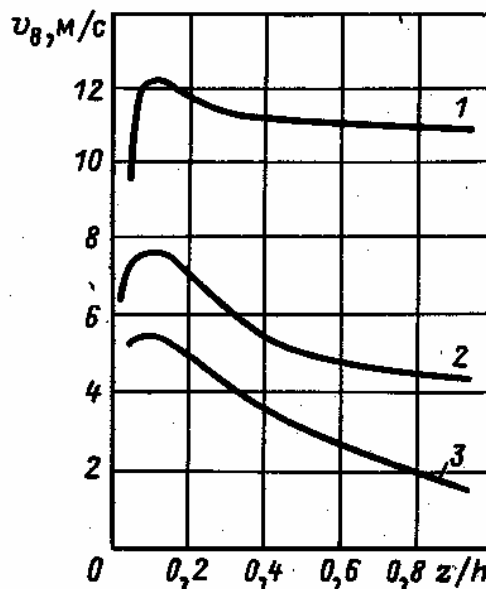
Экспериментальные данные по распределению потоков электрического ветра, наиболее существенные из которых представлены на рис.2.4-2.7, позволяют сделать следующие обобщающие выводы:

1. Скорость электрического ветра линейно зависит от корня квадратного из тока (рис.2.4). Значения скорости для положительной и отрицательной полярностей напряжения обратно пропорциональны корню квадратному из подвижности ионов. Соответственно значения скорости, для любой полярности, ложатся на единую линейную зависимость от напряжения.



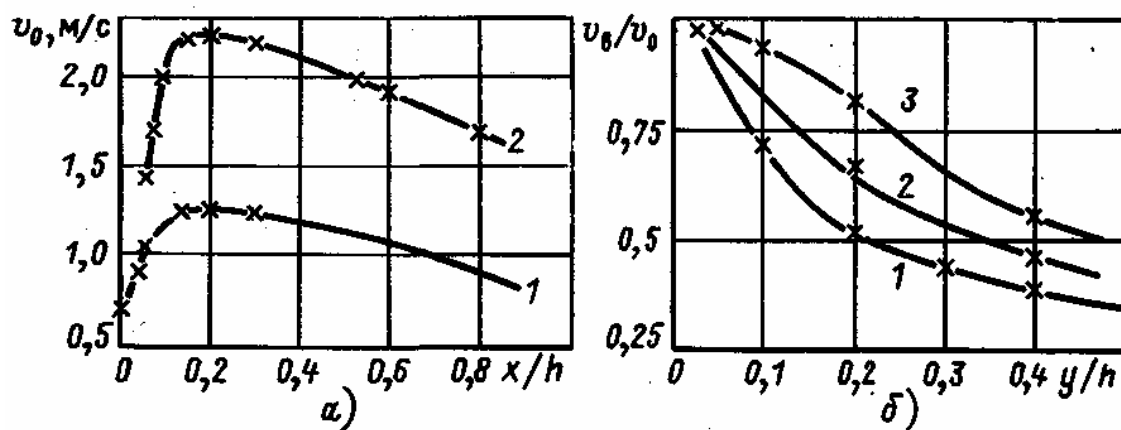
**Рисунок 2.4.** Зависимость скорости ветра от тока при расстоянии 15 мм от иглы. Система игла – плоскость,  $h = 100$  мм: 1 – отрицательная полярность; 2 – положительная полярность

2. Распределения скорости вдоль оси и в поперечном направлении (профили скорости) не зависят от напряжения, т.е. могут быть представлены в обобщенном виде (рис.2.5-2.6). Влияние параметров иглы или провода начинает сказываться только тогда, когда они начинают влиять на ток короны.



**Рисунок 2.5.** Распределение скорости ветра по оси. Система электродов игла-плоскость: 1 –  $h = 50$  мм; 2 –  $h = 100$  мм; 3 –  $h = 150$  мм





**Рисунок 2.6.** Распределение скорости ветра в системе электродов провод – плоскость: **а** – распределение скорости ветра по оси  $x$  при  $h = 100$  мм;  $d_{np} = 0,19$  мм; 1 –  $U = 20$  кВ, 2 –  $U = 50$  кВ; **б** – относительные профили скорости ветра при  $A = 100$  мм; 1 –  $x/h = 0,1$ ; 2 –  $x/h = 0,3$ ; 3 –  $x/h = 0,6$ .

Экспериментальные профили ветра на любом расстоянии от иглы или провода (рис.2.6, б) аппроксимируются следующими зависимостями:

- для системы игла — плоскость (обозначения на рис.2.5):

$$v/v_0 = [1 + f(z) (r/z)^{3/2}]^{-1},$$

где  $v_0$  — скорость ветра на оси;

$$f(z) = 4h^{1/2} / (1 - z/h)^{3/2};$$

- для системы провод—плоскость (обозначения на рис.2.6):

$$v/v_0 = [1 + f(z) (y/h)^{3/2}]^{-1},$$

где

$$f(z) = (1,7 + 0,14h/z) (h/0,02)^{3/4}.$$

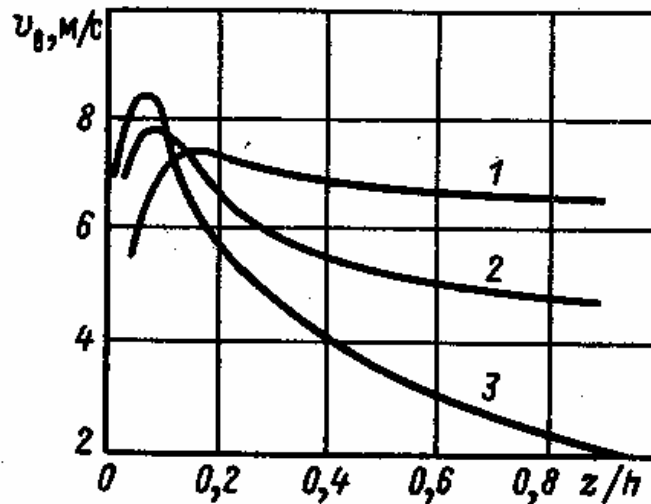
В этих формулах межэлектродное расстояние  $h$  следует подставлять в метрах.

3. Скорость электрического ветра имеет наибольшее значение в системе игла-плоскость и достигает 12 м/с, а в системе провод-плоскость не превышает  $2,3 \div 2,5$  м/с.

Характер распределения скорости вдоль оси в значительной степени зависит от межэлектродного расстояния: по мере увеличения

расстояния возрастает спад скорости к плоскости. Если при  $h = 50$  мм скорость ветра в промежутке практически постоянна, то при  $h = 150$  мм она изменяется более чем в 3 раза.

Интересно сопоставить распределения скорости при одинаковом токе короны и различных межэлектродных расстояниях (рис.2.7). Максимальное значение скорости несколько увеличивается с ростом межэлектродного расстояния за счет более резкого изменения ее вдоль промежутка.



**Рисунок 2.7.** Распределение скорости ветра вдоль оси при  $A^{0,5} = 10 \text{ мкА}^{0,5}$ . Система электродов игла-плоскость: 1 –  $h = 50$  мм; 2 –  $h = 100$  мм; 3 –  $h = 150$  мм.

На основании обобщения экспериментальных данных получены формулы для распределения скорости вдоль оси струи электрического ветра для системы игла-плоскость:

$$v_0 = \left( \frac{a_1 I}{k \gamma_0 h} \right)^{1/2} z_1 [(1 + b z_1)^{1/2} (1 + c z_1)]^{-1},$$

где  $a = 6,2 \cdot 10^5 h^{7/3}$ ;  $b = 2 \cdot 10^3 h$ ;  $c = 6,6 \cdot 10^2 h^3$ ;  $z_1 = z/h$ ; для системы провод-плоскость:

$$v_0 = \left( \frac{A}{k \gamma_0} \right)^{1/2} d (1 + b/z_1) [1 + c z_1 + g z_1^4],$$

где  $b = 3,5 \cdot 10^{-2} (h/0,05)^{-0,5}$ ;  $c = 0,75 \cdot [1 - (0,049 \cdot h)^4]$ ;  $d = [1 - 0,25 \cdot (0,05/h)^4] \cdot 10^2$ ;  $g = 1$  при  $h \geq 0,15$  м и  $g = 0$  при  $h < 0,15$  м.

Формулы применимы при  $0,05 \text{ м} \leq h \leq 0,15 \text{ м}$ ; значение  $h$  следует подставлять в формулы в метрах.

4. Сравнительно медленное формирование электрического ветра во времени дает основание предполагать, что существенное влияние на характерные параметры ветра должно оказывать наличие внешнего потока воздуха.

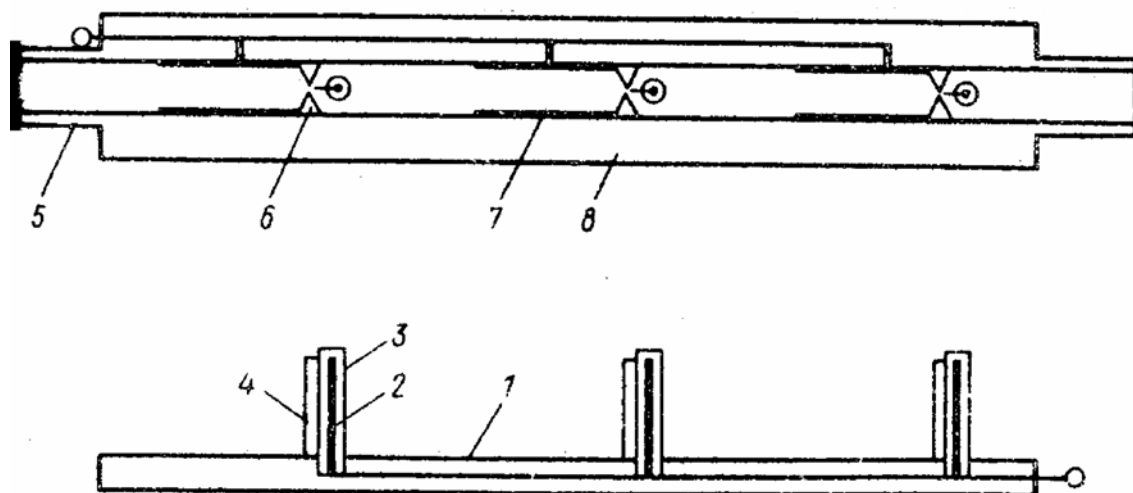
### ***Практическое применение электрического ветра***

Электрический ветер используется в различных устройствах по очистке воздуха, ионизаторах, теплообменниках, озонаторах и др. Имеется ряд работ по исследованию влияния коронного разряда на обтекание тел воздушным потоком. Если организовать электрический ветер в системе электродов лезвие-щель, то можно получить эффект сквозной прокачки, т.е. организовать ЭГД-насос. Такого рода ЭГД-насосы используются в современных воздухоочистителях.

Наиболее распространенной конструкцией ЭГД-насоса является система типа «игла-кольцо». Принцип действия этих насосов таков: у острия игольчатого электрода возникает «корона», во внешней зоне которой формируется электрический заряд, вызывающий направленное движение газа в целом. Конструктивные особенности различных устройств обычно связаны с изменением формы и способа размещения электродов.

ЭГД-насосы выгодно отличаются от электромеханических полным отсутствием трущихся и движущихся элементов, а, следовательно, высокой надежностью и полной бесшумностью в работе. Кроме того, они компактны и просты в изготовлении. ЭГД-насосы удобно использовать в теплообменниках, а также в устройствах пневмоавтоматики, где в качестве теплоносителя можно применять газы. Во всех этих устройствах желательно использовать течения газа в некотором внешнем контуре, вдали от места подключения высокого напряжения. Как показали исследования, выведение ЭГД-течения за пределы межэлектродного промежутка представляет сложную задачу, для решения которой необходима информация о физике ЭГД-процессов.

Классический вид конструкции ЭГД-насоса типа «лезвие – две параллельные пластины» представлен на рис.2.8. Эта система является аналогом системы «игла – кольцо», но для повышения производительности и упрощения геометрии течения вместо игольчатого электрода использован лезвиеобразный (4), а вместо кольца – две параллельные пластины (7).



**Рисунок 2.8.** . Классический вид ЭГД–насоса типа «лезвие – две параллельные пластины». Подробное описание представлено в тексте.

Конструктивно насос выполнен в виде канала прямоугольного сечения (1), (8) из плексигласа, в котором размещены три секции насоса, включенные, в зависимости от расположения и питания, последовательно – гидродинамически и параллельно – электрически. В предложенной конструкции эмиттерные и коллекторные электроды разделены коническими потокоограничивающими вставками (6) из плексигласа, предназначенными для устранения внутренних вихрей. Эмиттерные электроды укреплены на изолирующей пластине (5) при помощи медных штырей (2), изолированных полиэтиленовой трубкой (3). Лезвия (4) выполнены из режущей части бритвы и подпаяны к штырям.

### **Естественная конвекция.**

Задачи конвективного теплообмена и конвективного охлаждения являются одними из актуальных задач в технике. К таким задачам, безусловно, относятся вопросы охлаждения открытых токонесущих конструкций. Как известно, при прохождении больших токов по проводящим деталям конструкций осуществляется их нагрев. Возникает вопрос максимального отвода мощности теплового нагрева в окружающую среду. Такой отвод тепла осуществляется в естественных условиях посредством конвективного охлаждения и излучения.

В справочной литературе и технике для расчета конвективного теплообмена приводятся конвективные коэффициенты поверхностей детали. Однако, имея сложную геометрию детали, возникает проблема оценки точности и собственно применимости таких коэффициентов. Возникла необходимость расчета, помимо собственно нагреваемой детали, окружающей среды. В этом случае уже вычисляются тепловые потоки – расчет в этом случае более точный. Но тут возникает проблема решения совместного нелинейных уравнений гидродинамики и

теплопроводности. Решение подобного рода задач обычно осуществляется численно [6]. При этом используются специализированные пакеты, такие как *ANSYS*, *CFD*, *Femlab* и др. Каждый из этих пакетов использует численные методы решения нелинейных уравнений в частных производных (метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объемов и др.).

Целью данной работы является исследование влияния электрического ветра на термогравитационную конвекцию в среде, которая осуществляется за счет теплообмена с твердым телом, нагретым постоянным током.

Задачи интенсификации теплообмена электрическим полем рассматриваются давно [13]. В условиях использования высоковольтных электрических полей это конструктивно оправдано, т.к. теплообменники, использующие наряду с естественной конвекцией еще и электрическую просты в изготовлении, не содержат трущихся и движущихся частей и потребляют весьма мало энергии для своей работы. При этом интенсификация теплообмена весьма существенна.

Отсутствие механического равновесия в неоднородно нагретой жидкости приводит к возникновению в жидкости внутренних течений, стремящихся перемешать жидкость так, чтобы в ней установилась постоянная температура. Такое возникающее в жидкости движение называют естественной (термогравитационной) конвекцией [5].

В несжимаемой жидкости изменением плотности под действием изменения давления можно пренебречь. Изменение плотности под действием температуры приводит к появлению конвективного движения.

Запишем температуру в виде  $T = T_0 + T'$ , где  $T_0$  есть некоторое постоянное значение, от которого отсчитывается изменение температуры за счет неоднородного нагрева  $T'$ . В соответствии с этим  $P = P_0 + P'$  и  $\rho = \rho_0 + \rho'$ , причем  $\rho' = \left(\frac{\partial \rho_0}{\partial T}\right)_P T' = -\rho_0 \beta T'$ , где  $\beta = -\rho^{-1} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)$  – температурный коэффициент расширения жидкости.  $P_0 = \rho_0 \cdot g \cdot r + const$  – изменение давления с высотой. С учетом сделанных допущений уравнения Навье-Стокса и уравнение теплопроводности примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \text{div}(\rho' V) &= 0, \\ \text{div}(V) &= 0, \\ (V \nabla) V &= -\nabla \frac{P'}{\rho_0} - g \beta T' + \nu \Delta V, \\ V \nabla T' &= \chi \Delta T', \end{aligned}$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\nu$  – вязкость,  $V$  – вектор скорости течения жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – температурный коэффициент расширения жидкости,  $\chi$  – температуропроводность,  $Q$  – теплота,  $q$  – теплоток,  $\cos\varphi$  – косинус фазового угла между током и напряжением (в нашем случае 1),  $I$  – ток,  $R$  – напряжение,  $\varepsilon$  – коэффициент серости,  $\sigma=5,67\cdot 10^{-8}$  – коэффициент Стефана-Болцмана.

В систему гидродинамических уравнений входят два параметра  $\nu$  и  $\chi$ . Кроме того, решение этих уравнений в случае вынужденной конвекции зависит еще от характерного параметра длины  $l$ , скорости  $U$  и разности температур  $[T_I-T_0]$ .

Таким образом, конвекция характеризуется в рассматриваемых условиях пятью параметрами:

$$[\nu] = [\chi] = \text{см}^2/\text{с}, [U] = \text{см}/\text{с}, [l] = \text{см}, [T_I-T_0] = \text{град}.$$

Из них можно составить две независимые безразмерные комбинации. В качестве таких обычно используют число Рейнольдса  $Re = U \cdot l / \nu$  и число Прандтля, определяемое как отношение вязкости к теплопроводности  $Pr = \nu / \chi$ . Число Прандтля – это материальная константа вещества, которая не зависит от свойств потока. Распределение температуры зависит от  $Pr$  и  $Re$ ; а распределение скоростей только от  $Re$ . Два конвективных потока подобны, если их  $Re$  и  $Pr$  одинаковы.

Теплопередачу между твердыми телами и жидкостью характеризуют обычно так называемым коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ , определяемым как:

$$\alpha = q / (T_I - T_0), \quad (2.2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, численно равная количеству тепла, передаваемого сквозь единицу площади поверхности тела за единицу времени,  $T_I$  – температура нагревательного элемента,  $T_0$  – температура окружающей среды. Для воздуха у гладкой стенки коэффициент теплоотдачи равен  $(5,6 + 4 \cdot \nu [\text{м}/\text{с}]) [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$  [15].

Коэффициент теплопередачи является размерной величиной. В качестве безразмерной величины, характеризующей теплопередачу, пользуются числом Нуссельта  $Nu = \alpha \cdot l / \chi$ .

Из соображений подобия следует, что для каждого типа конвективного движения число Нуссельта определено функцией, зависящей только от чисел Рейнольдса и Прандтля:

$$Nu = f(Re, Pr).$$

Для малых значений  $Re$  эта функция является постоянной.

В случае свободной конвекции есть еще и сила  $g\beta$ . Кроме того, в решении системы уравнений конвекции входят характерная длина  $h$  и характерная разность температур  $\Theta$ . Характерная скорость отсутствует, поскольку никакого вынужденного сторонними силами движения нет, движение жидкости обусловлено ее неравномерным распределением тепла. Основной характеристикой естественной конвекции является безразмерная комбинация этих величин, т.н. число Релея:

$$R_l = \frac{g\beta\Theta h^3}{\nu\chi}.$$

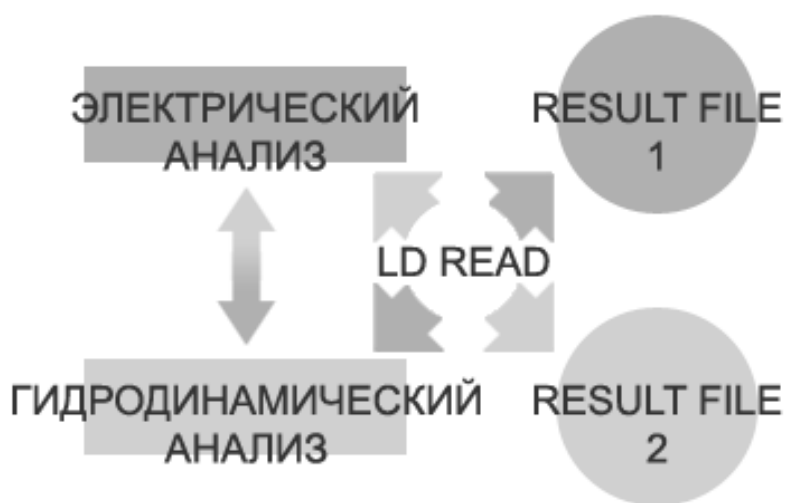
В целом для характеристики свободной конвекции в качестве независимой комбинации обычно выбирают число Прандтля и число Релея. Закон подобия для свободной конвекции гласит:

$$\nu = \frac{\nu}{h} f\left(\frac{r}{h}, R_l, Pr\right), \quad T = \theta f\left(\frac{r}{h}, R_l, Pr\right).$$

Теплопередачу при конвекции в поле тяжести характеризуют числом Нуссельта, оно является функцией от чисел Прандтля и Релея. Конвекция становится турбулентной при больших числах Релея.

### 3. Численное моделирование естественной конвекции.

Для решения задачи термогравитационной конвекции от нагреваемого твердого тела использовался последовательный сопряженный анализ физических сред. Последовательность решения можно изобразить в виде схемы (рис.3.1):



**Рисунок 3.1.** Последовательность решения термогравитационной задачи

Сначала выполняется электрический анализ: прохождение постоянного тока через нагревательный элемент. Полученные результаты записываются во внешний файл и в дальнейшем служат нагрузкой для гидродинамического анализа (в нашем случае такой нагрузкой является *HFLUX*, прикладываемый на узлы твердотельной модели).

После решения гидродинамической задачи, полученные результаты вновь записываются во внешний файл, правда, соответствующий уже другой физической среде – гидродинамике. Затем эти результаты служат нагрузками для электрического анализа (для данной задачи такой нагрузкой служила температура), после чего вышеописанная процедура повторяется заданное количество раз. Критериями, задающими количество повторений, могут быть, например, как заданный временной промежуток, так и достижение определенной сходимости результатов.

### **Электрический анализ:**

Первая часть сопряженного анализа представляет собой нестационарную задачу прохождения тока через нагревательный элемент. Для моделирования нагревателя используется элемент *PLANE67*, с искомыми функциями: напряжение – *VOLT* и температура – *TEMP*. В качестве свойств задаётся удельное сопротивление образца и его теплопроводность, каждая из этих величин зависит от температуры. Строится упорядоченная четырехгранная сетка. В качестве граничных условий задаётся разность потенциалов между стенками нагревателя. Значение напряжения устанавливается по заданию преподавателя.

### **Гидродинамический анализ:**

Вторая часть задачи – стационарный гидродинамический анализ. Строится упорядоченная четырехгранная сетка. Задаётся два типа граничных условий: температура на боковых стенках с учетом лучистого теплообмена и без него. В качестве нагреваемой среды используется воздух, свойства которого зависят от температуры.

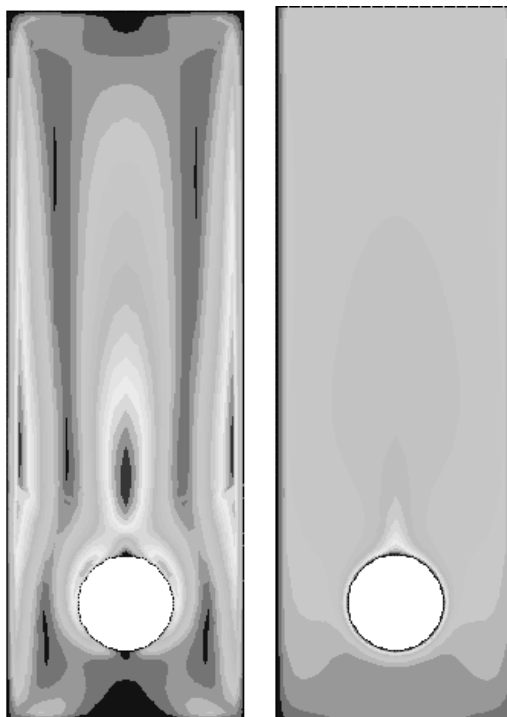
Программы расчетов: *term1* – без учета излучения и *term2* – с учетом излучения находятся в приложении. Каждая из программ снабжена комментариями и пояснениями.

На рис.3.2 представлены результаты решения для цилиндрического нагреваемого элемента, размещённого в канале: скорости тепловых потоков естественной конвекции от нагреваемого цилиндра в воздухе, рассчитанные в *АНСИС* и распределения температур.

Видно, что от верхней поверхности нагреваемого цилиндра распространяется нагретый поток воздуха, температура окружающей среды однородна, за исключением тонкого пристеночного слоя и



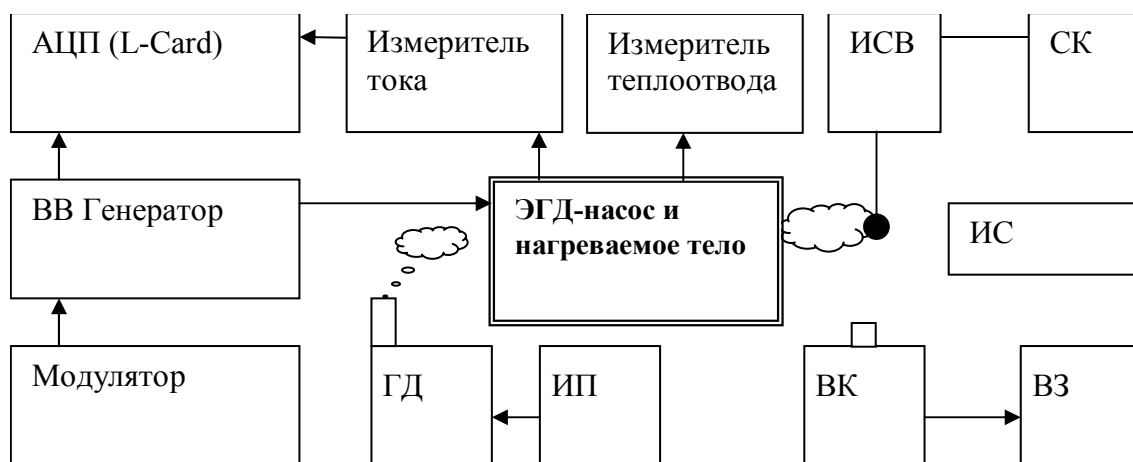
вертикальной струи. Скорость теплового потока при температуре нагрева 430 К не превышает 0,2 м/с.



**Рисунок 3.2.** Распределения скорости естественной конвекции (слева) и распределение температуры при естественной конвекции (справа) от нагреваемого цилиндра.

#### 4. Описание экспериментальной установки

Исследование влияния коронного разряда и электрического ветра в воздухе на процессы теплоотвода от нагреваемого тела исследуются на экспериментальной установке изображенной на рис.4.1.

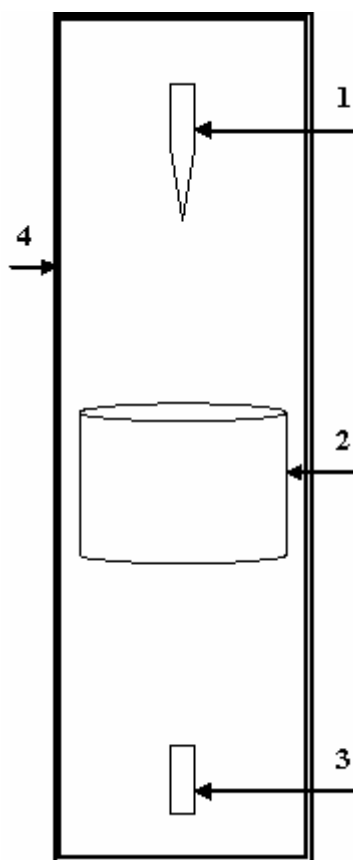


**Рисунок 4.1.** Блок-схема экспериментальной установки

Электрический ветер создается в системе электродов игла-кольцо (рис.4.2) и визуализируется при помощи визуализирующих включений, в частности струи дыма (рис.4.1). Установка позволяет определить порог возникновения электрического ветра, связать порог возникновения электрического ветра с порогом зажигания короны, исследовать вольтамперную характеристику электрического ветра и зависимость интенсивности теплоотвода от твердого тела от скорости электрического ветра и напряжения на источнике.

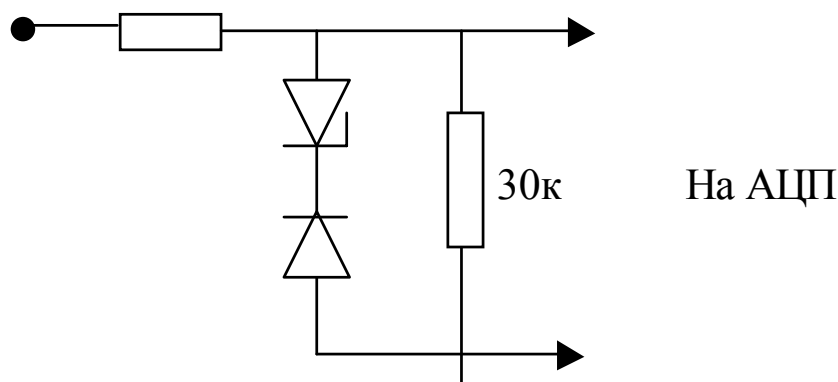
Исследование зависимости скорости сквозной прокачки от напряжения можно проводить двумя методами: методом регистрации движения дымовых включений и методом измерения силы давления электрического ветра на пробный диск.

Напряжение на ЭГД-насос, образующий электрический ветер, подается с высоковольтного генератора (ВВ Генератор, рис.4.1). Напряжение, подаваемое с высоковольтного генератора, может быть модулировано от внешнего источника, например, с генератора сигналов специальной формы. Напряжение, пропорциональное ( $1:10^4$ ) подаваемому на ЭГД-насос, подается на плату АЦП (*L-Card*) для записи в компьютер и дальнейшей обработки.



**Рисунок 4.2.** Конструкция ЭГД-насоса, вид сбоку: 1 – высоковольтный электрод, 2 – электрод-кольцо, 3 – нагревательный элемент, 4 – корпус из пластика.

Для измерения тока, протекающего через ЭГД-насос, к электроду-кольцо подключена схема измерения тока (рис.4.3). Видно, что напряжение снимается с сопротивления 30 кОм, а стабилитрон и диод используются для защиты АЦП от пробоя высоким напряжением, более 10 В. Снимаемое напряжение также подается АЦП (*L-Card*).

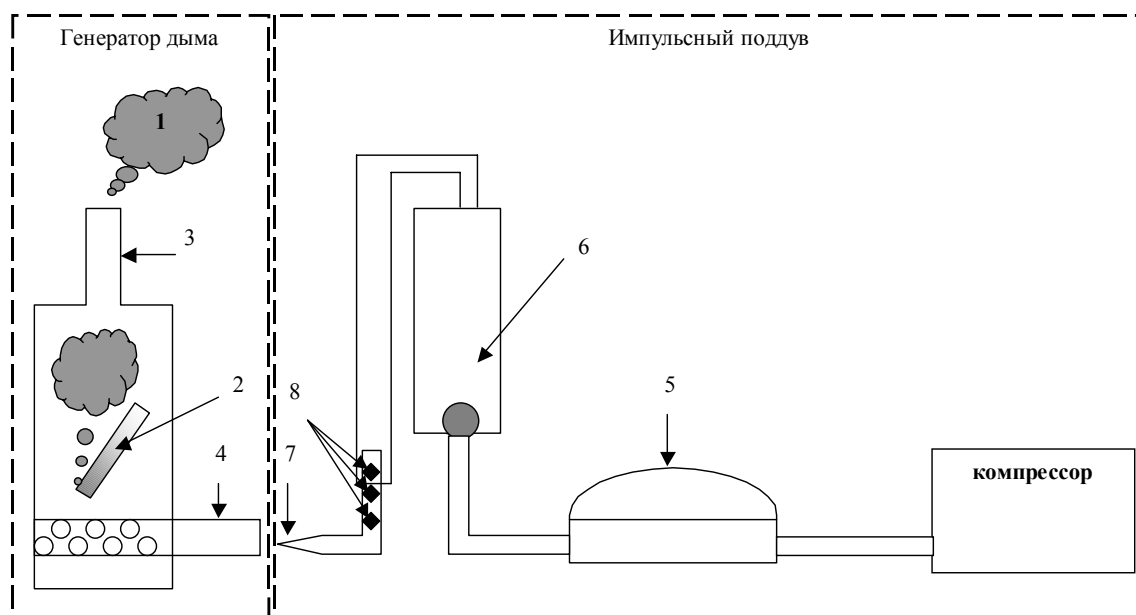


**Рисунок 4.3.** Схема измерения тока через ЭГД-насос.

На АЦП (*L-Card*) также подается синхроимпульс с выхода модулятора.

Исследование движения частиц микронных размеров при помощи лазерной доплероскопии требует дорогостоящей аппаратуры. В нашей установке для визуализации движения воздуха через ЭГД-насос используется дым, выдуваемый из генератора дыма (ГД, рис.4.1) импульсным поддувом (ИП) небольшими порциями (сгустками) дыма с четкими границами. Схема генератора дыма с импульсным поддувом представлена на рис.4.4. Дым (1, рис.4.4) образуется при тлении прессованных опилок (2), закрепленных внутри небольшой «топки» с трубой (3) для выхода дыма и трубкой (4) для подачи воздуха. На той части трубки (4), которая расположена внутри «печки» сделана перфорация для свободного прохождения воздуха. Для поддержания непрерывного тления опилок, осуществляется принудительная подача воздуха от импульсного поддува (рис.4.4). Воздух прокачивается компрессором через небольшую емкость (5) с упругой резиновой мембраной, выполняющей функцию ёмкости или накопителя сжатого воздуха. Далее воздух проходит через отверстие, закрытое металлическим шариком (6). Когда в емкости (5) создается достаточное давление металлический шарик (6) приподнимается и открывает отверстие для прохождения воздуха. Таким образом, работает источник импульсной подачи воздуха в «топку», или импульсный поддув. Далее воздух через тонкое отверстие в насадке (7) подается в «топку». Отверстия (8) служат для регулирования скорости истечения воздуха через основное отверстие.

Регулировка производится открытием или закрытием дополнительных отверстий при перемещении насадки (7) в шланг или обратно.

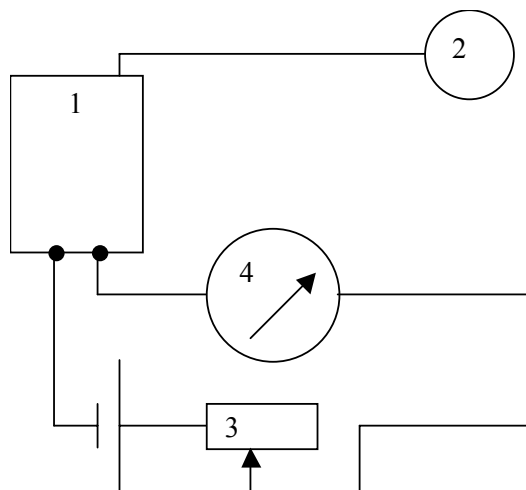


**Рисунок 4.4.** Генератор дыма с импульсным поддувом

Сгустки дыма на выходе ЭГД-насоса, освещаемые источником света (ИС, рис.4.1), фиксируется видеокамерой (ВК) и записываются на компьютер через видеозахват (ВЗ). Источник света может быть непрерывным, т.е. питаться от источника постоянного напряжения. В данном случае светодиод, подключается к выходу генератора сигналов специальной формы и питается импульсным напряжением нужной частоты и амплитудой до 5 В. При хорошей настройке генератора дыма он подает сгустки дыма с частотой единицы Герц. При обоснованном выборе частоты стробированной подсветки этого достаточно для измерения скорости сквозной прокачки воздуха через щелевые электроды.

Наряду с генератором дыма в отдельных измерениях можно использовать более крупные частицы, в качестве которых используется тальк. Траектории частичек талька получаются более четкими и позволяют точнее измерить скорость и провести калибровку измерителя скорости ИСВ.

Измеритель скорости ветра (ИСВ, рис.4.1) представляет собой торсионный механизм, принцип действия которого основан на компенсации нагрузки на измерительный элемент с помощью схемы компенсации (СК). Схема измерителя скорости ветра представлена на рис.4.5.



**Рисунок 4.5.** Схема измерителя скорости ветра.

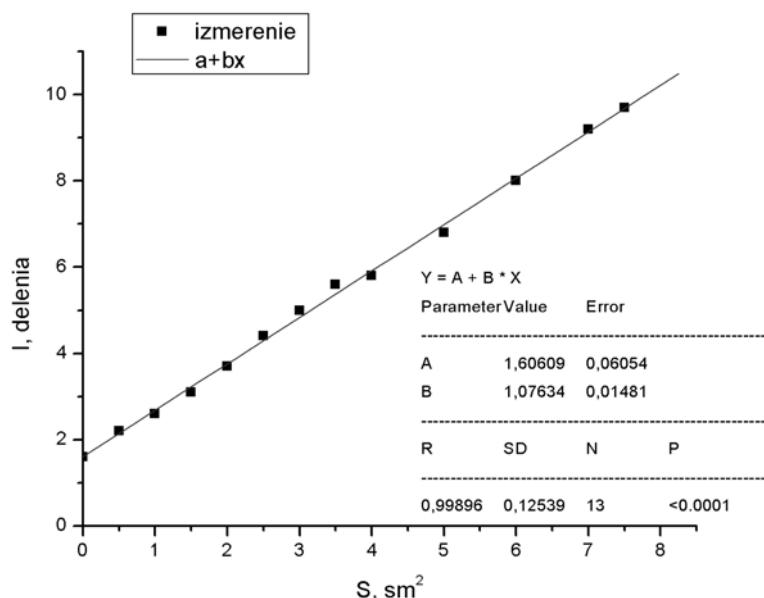
В данной установке используется подвижный измерительный элемент амперметра (1, рис.4.5), на стрелке которого закреплен пробный диск (2). Вытекающий из ЭГД-насоса воздух давит на пробный диск. Сила лобового сопротивления диска потоку воздуха, как известно из гидродинамики, пропорциональна квадрату скорости натекающего потока:

$$F = c \cdot S \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4.1)$$

где  $S$  – площадь площадки, на которую действует воздух, в данном случае наш площадь пробного диска,  $\rho$  – плотность воздуха,  $v$  – скорость натекания воздуха на диск,  $c$  – некоторая константа, величина которой зависит от формы пробного диска (для тонкой пластины, размещённой поперёк потока  $c = 1,11$ ). Под действием натекающего воздуха пробный диск отклоняется от своего равновесного положения. Для того чтобы вернуть его в начальное положение необходимо пропустить через используемый измерительный элемент (1, рис.4.5) некоторый электрический ток. Для этого используется элемент питания 1,5, ток от которого через реостат подается на измерительный элемент. Величина этого тока измеряется стрелочным амперметром, также установленным в эту цепь (рис.4.5). При измерении устанавливается зависимость скорости натекающего потока от тока, через измерительный элемент. Калибровка торсионного элемента производилась методом взвешивания. Калибровочная кривая представлена на рис.4.6. Учитывая зависимость (4.1) получим зависимость скорости натекающего потока воздуха от тока компенсации через измерительный элемент:

$$v \left[ \frac{м}{с} \right] = 1,05 \sqrt{\frac{I \left[ \frac{дел}{с} \right]}{S \left[ см^2 \right]}}.$$

Для уточнения полученной зависимости можно получить значение скорости натекающего потока хот я бы в одной точке. Это можно произвести путем анализа видеозаписей электрического ветра при его визуализации сгустками дыма.



**Рисунок 4.6.** Калибровочная кривая.  $I$  – ток компенсации (деления),  $S$  – площадь бумажного груза ( $\rho = 80 \text{ г/м}^2$ ).

Процесс интенсификации теплообмена регистрируется по изменению температуры нагревательного элемента с помощью термопары мультиметра MAX-Z650. Термопара устанавливается на нагревательный элемент, значения температуры считывается по индикатору прибора и используется в дальнейшем для анализа изменения коэффициента теплоотдачи (2.2).

## 5. Задание на предварительную подготовку

- Рассчитать поле температур в экспериментальной кювете для заданной мощности, выделяемой в нагреваемом элементе по программе приведенной в приложении.
- Провести анализ картины конвективного теплоотвода от нагреваемого тела. Оценить скорость конвективного потока нагреваемого воздуха и коэффициент конвективной теплоотдачи.
- Измерить температуру поверхности нагреваемого элемента при заданной мощности нагрева и сравнить с расчётной.

## 6. Задание на проведение работы

1. Записать картину электрического ветра в ЭГД-насосе и снять вольтамперную характеристику насоса. Установить взаимозависимость порога электрического ветра и коронного разряда.
2. Получить картину термогравитационного конвективного потока с помощью дыма при наличии электрического ветра и без него.
3. Определить зависимость величины отводимой от нагреваемого элемента тепловой мощности от напряжения на электродах ЭГД-насоса и тока.
4. Провести подробный анализ полученных результатов, оценить степень интенсификации теплоотвода от нагреваемого тела за счет электрического ветра.

## 7. Порядок проведения экспериментов

1. Включить и прогреть приборы,
2. Подключить АЦП (*L-Card*) к лабораторной установке,
3. Включить компьютеры, включить программы *L-graf* или *L-Card Explorer 5*, написанную с участием студентов направления «Прикладные математика и физика» физического факультета СПбГУ, для регистрации вольтамперных характеристик и *Ulef DVD MovieFactory* (или другую программу, позволяющую работать с видеозахватом, например, *Adobe Premier*) для регистрации видеоизображения.
4. Настроить, сфокусировать, видеокамеру на высоковольтный электрод в межэлектродной области, фокусировку удобно проводить на электрод-иглу, так, чтобы на экране была видна вспышка светодиода от синхроимпульса.
5. Включить высоковольтный генератор, включить внешнее управление выходным напряжением (модуляцию высокого напряжения). Модуляцию проводить пилообразным сигналом частотой  $0,01 \div 0,02$  Гц. Уровень модулирующего сигнала установить таким образом, чтобы корона появлялась на незначительное время, установить время записи видеоизображения и вольтамперной характеристики на  $1 \div 1,5$  периода сигнала, т.е. на  $100 \div 150$  секунд при частоте модуляции  $0,01$  Гц. Записать видеоизображение и вольтамперную характеристику в темноте для регистрации момента образования короны.
6. Включить генератор дыма с импульсным поддувом и записать вольтамперную характеристику и видео для определения момента образования короны в воздухе с дымом.
7. Включить источник света. Записать видеоизображение и вольтамперную характеристику для регистрации момента образования электрического ветра.

8. По полученным вольтамперной характеристике можно проследить переход из режима насыщения в режим «пробоя». Напоминаем, что пробоем здесь называется режим активизации лавинного механизма.
9. Анализ видеороликов позволяет определить порог возникновения электрического ветра и связать его с порогом зажигания короны. В отчете о работе необходимо эти события отметить на вольтамперной характеристике процесса и представить обоснование.
10. Добавить напряжение модулирующего сигнала и снять вольтамперную характеристику ЭГД-насоса при больших напряжениях ( $\sim 10$  кВ). **ВНИМАНИЕ!!!!!!** При настройке напряжения необходимо временно отключать АЦП от лабораторной установки, т.к. при случайном пробое межэлектродного пространства компьютер может отключиться (зависнуть).
11. Для исследования скорости электрического ветра на выходе ЭГД-насоса настроить видеокамеру на измерительный диск. Необходимо отметить чертой на экране монитора положение пробного диска при отсутствии электрического ветра. С высоковольтного генератора на ЭГД-насос подаем постоянное напряжение (при помощи внутренней регулировки напряжения). Возникающий электрический ветер отклоняет пробный диск от положения равновесия. Потенциометром системы компенсации возвращаем пробный диск в исходное положение и фиксируем необходимый для этого ток. Следует отметить, что скорость электрического ветра флуктуирует во времени, причем интенсивность флуктуаций с ростом напряжения растет. Среднее отклонение от положения равновесия необходимо установить нулевым.
12. Для измерения тока и напряжения в исследуемой точке необходимо записать их в течение  $\sim 1$  сек, а затем вычислить среднеарифметическое значение.
13. Для видеозаписи ЭГД-течений необходимо настроить генератор дыма или генератор мелких частиц. Включить стробирующую подсветку и подобрать необходимую частоту. Настроить видеосистему до получения контрастной картины течения на экране монитора. Струйки дыма или частицы талька при пересечении экранного пространства должны несколько раз подсвечиваться световым импульсом. Также записываем видео для определения скорости электрического ветра.
14. Повторяем описанные процедуры для разных напряжений ЭГД-насоса.
15. По результатам анализа данных составить подробный отчет по работе. Отчет должен содержать:
  - а. Вольтамперную характеристику процесса с пометками порога зажигания короны и порога возникновения электрического ветра, приложить видеок cadры, подтверждающие возникновение упомянутых событий,



- б. Видеокадры электрического ветра в указанном диапазоне напряжений, раскадровки, по которым определялись скорости процесса, зависимость скорости электрического ветра от напряжения.

## 8. Обработка экспериментальных данных

При записи данных эксперимента мы получаем следующие типы файлов: \*.dat, \*.par, \*.mpg (\*.avi). Первые два типа файлов содержат информацию об электрических параметрах эксперимента, первый – сами отсчеты всех регистрируемых каналов, второй – параметры регистрации данных, такие как частота дискретизации, количество отсчетов, коэффициенты усиления каждого канала и т.п., третий тип файлов содержит видеоинформацию. Работать предстоит, в основном, с первым и третьим типами файлов.

Электрические параметры экспериментов регистрируются в отсчетах, которые надо переводить в абсолютные значения. Кроме того, формат представления данных в файле \*.dat не позволяет работать с ним без предварительной подготовки, которая, в данном случае, заключается в изменении формата данных. Это делается с помощью программы *bin2mat*, или с помощью программы *Signal\_Converter\_v1\_0.exe*, написанной с участием студентов направления «Прикладные математика и физика» физического факультета СПбГУ и позволяющей конвертировать файлы \*.dat в файлы \*.mat. При этом с помощью программы *Signal\_Converter\_v1\_0.exe* сделать это гораздо проще, достаточно просто подвести курсор к нужному файлу и нажать правую кнопку «мышки» и в открывшемся меню выбрать строчку *Конвертировать в mat-файл*. Получаем файл с расширением \*.mat, с которым и предстоит работать дальше. Данные в этом файле расположены по порядку, т.е. сначала идут первые отсчеты каждого канала, потом вторые отсчеты каждого канала и так далее. Подробнее с работой АЦП можно в высоковольтной лаборатории или в лаборатории ФОМПИ направления ПМФ физического факультета СПбГУ по описанию соответствующей лабораторной работы.

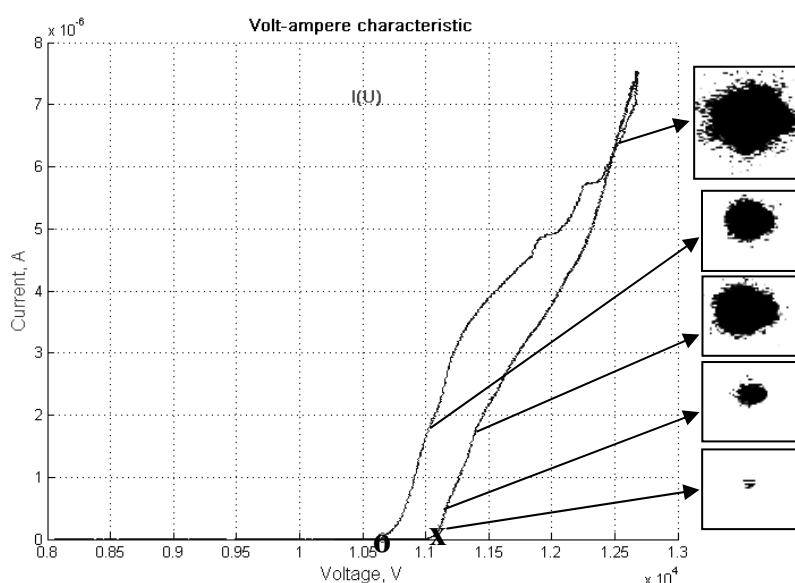
В этой работе, обычно, первый канал АЦП регистрирует величину напряжения, подаваемого на электрод, второй – ток, протекающий между электродами, а третий канал АЦП регистрирует синхроимпульс, который, обычно, занимает всего один отсчет. Этот синхроимпульс и служит точкой «привязки» по времени вольтамперных характеристик и видеоряда.

Полученный видеофайл надо просмотреть, отметить необходимые кадры, на которых наблюдаются необходимые события, например момент зажигания коронного разряда, а также найти кадр с синхроимпульсом. Зная, что длительность кадра составляет 0,04 секунды (при частоте следования 25 кадров в секунду), нетрудно сопоставить номерам выбранных кадров соответствующие им значения электрических

параметров при обработке полученного *mat*-файла с электрическими данными в программе *Matlab*.

### **Вольтамперная характеристика**

В работе необходимо получить вольтамперную характеристику коронного разряда, сопровождаемого электрическим ветром в интервале напряжений от 0 до 13 кВ. Модуляция высокого напряжения проводится пилообразным сигналом с частотой 0,01 Гц. После синхронизации видеоряда и данных, полученных с АЦП, определяется напряжение зажигания и погасания короны. Типовая вольтамперная характеристика представлена на рис.8.1.

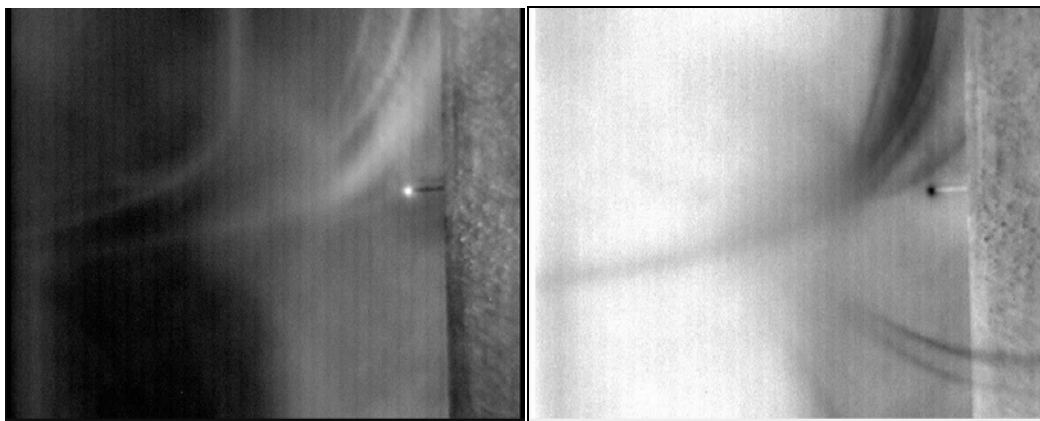


**Рисунок 8.1.** Вольтамперная характеристика ЭГД-насоса с указанием напряжения зажигания/погасания короны (отмечены символами “х” и “о”, соответственно) и фотографии коронного разряда.

Значения напряжений зажигания и погасания короны можно отметить на графике с указанием погрешностей, например  $U_{\text{зак}} = (10660 \pm 30) \text{ В}$  (отмечено символом “х”),  $U_{\text{пог}} = (11100 \pm 20) \text{ В}$  (отмечено символом “о”). Характерное значение силы тока, протекающего через межэлектродный промежуток при коронном разряде, составляет величину порядка единиц микроампер.

Получить зависимость тока нагревательного элемента от приложенного напряжения. Для визуализации движения воздуха через ЭГД-насос используется дым, выдуваемый из генератора дыма (рис.4.1).

Получить фотографии линий тока электрического ветра потоками дыма (рис.8.2).



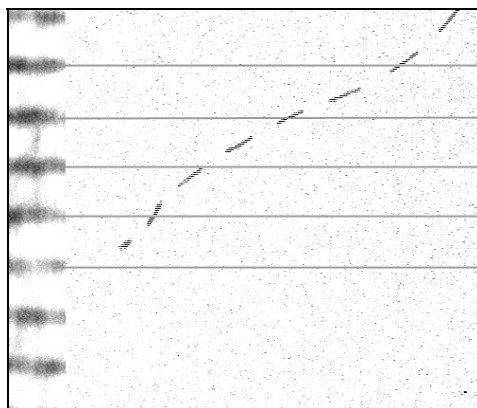
**Рисунок 8.2.** Кадр (слева) и негатив кадра (справа) видеозаписи потоков дыма как визуализации электрического ветра

На кадрах (рис.8.2) видны потоки дыма и области локализации короны. При этом можно точно определить напряжение зажигания короны и напряжение начала электрического ветра.

### **Определение скорости электрического ветра.**

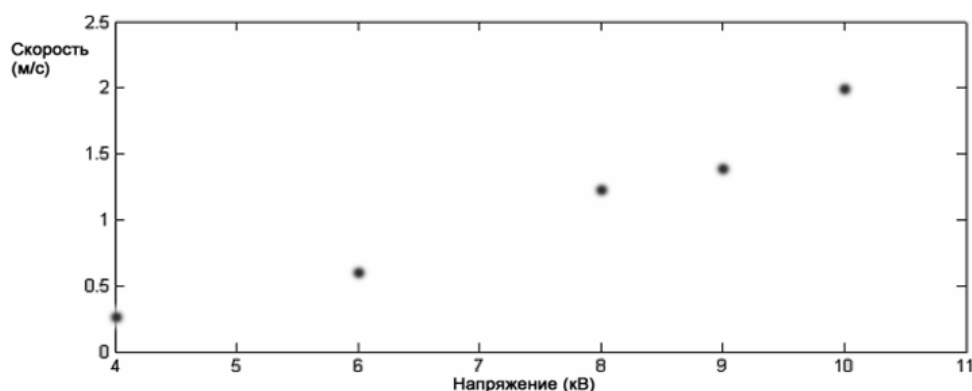
Используя метод компенсации, можно получить зависимость скорости электрического ветра от значения напряжения или тока. Предварительно производится калибровка установки. Для этого необходимо определить независимым методом значение скорости электрического ветра при фиксированном значении напряжения, например по данным видео записи электрического ветра.

Для этого обычно используется генератор пыли, который работает с частичками талька. По кадрам видеозаписи можно определить скорость частичек, благодаря стробирующей подсветке. За время регистрации одиночного кадра стробирующий диод успевает совершить несколько вспышек, так что на кадре (рис.8.3) мы видим траекторию движения визуализирующей частицы за длительность в различные моменты времени одного кадра.



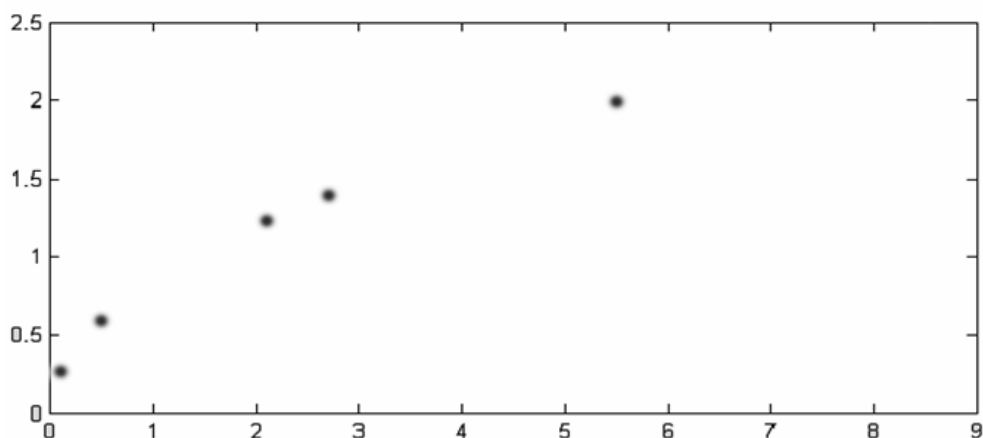
**Рисунок 8.3.** Трек частицы талька, горизонтальные линии – деления линейки 1 мм.

Ниже (рис.8.4) представлен график зависимости скорости частиц талька от напряжения.



**Рисунок 8.4.** Зависимость скорости частиц талька от подаваемого напряжения.

А зависимость скорости [м/с] полученная методом компенсации от тока компенсации [мкА] представлена на рис.8.5.



**Рисунок 8.5.** Зависимость скорости [м/с] от тока компенсации [мкА], полученная методом компенсации с помощью измерительного цилиндра.

Таким образом, данная установка позволяет экспериментально исследовать электрический ветер, определить напряжение, которое соответствует появлению ветра двумя способами: при помощи визуализации сгустками дыма и при помощи термоанемометра. По результатам измерений дать заключение, как появление электрического ветра совпадает с моментом зажигания короны.

## 9. Контрольные вопросы.

1. Чем определяется коэффициент конвективного теплоотвода.
2. Как зависит скорость электрического ветра от напряжения.

3. Каков механизм влияния электрического ветра на конвективный теплоотвод от нагретого тела.

## **10. Рекомендуемая литература**

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика: Гидродинамика, т.6 М.: Наука, 1986
2. С.В.Валландер. Лекции по гидроаэромеханике. Л.: Изд.ЛГУ, 1978
3. И.В.Савельев. Курс общей физики т.1: Механика. Колебания и волны. Молекулярная физика. М.: «Наука» 1970
4. Л.Прандтль. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «РХД», 2000
5. Г.А.Остроумов. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. М.-Л.: Гос. издательство техникотеоретической литературы. 1952
6. В.Н.Полежаев, А.В.Бунэ, Н.А.Верезуб. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнения Навье-Стокса. М.: Наука. 1987
7. Арабажи В.И. Об электрическом ветре с острия// Журн. техн. физики. 1950. Т.20. N 8.
8. Майбуров С.П., Остроумов. Г.А. Электрический ветер в жидкости и его реакция на острие// Электронная обработка материалов. 1967. N 4.
9. Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. 592 с.
11. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.Изд-во ЛГУ. 1989. 175 С.
12. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. Физические основы электрогидродинамики // М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979
13. Болога М.К., Гроссу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977. 265с.
14. Бортников В.С., Рубашов И.Б. Эдектрогидродинамическее эффекты и их применение. // Магнитная гидродинамика, 1976,» I. с.23-34.
15. Х.Кухлинг, Справочник по физике, Перевод с немецкого п/р Е.М.Лейкина, Издание второе, Москва, «Мир», 1985.
16. Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Николаев П.О., Стишков Ю.К. Полуавтоматический метод компьютерной обработки поля скоростей ЭГД-течений, Электронная обработка материалов, 2007, № 1, с.24-30.
17. С.Б. Афанасьев, И.Н. Петрушенко, Ю.К. Стишков «Некоторые особенности коронного разряда и электрического ветра в воздухе» Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006г. Санкт-Петербург.
18. С.Б. Афанасьев, Ю.А. Зарядов, А.С. Воинов, М.А. Морозов, Ю.К. Стишков Влияние барьерной изоляции на характер коронного

разряда в воздухе при атмосферном давлении Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006г. Санкт-Петербург.

## 11. Приложения

Используемые программные продукты:

- *L-graf*
- *L-card-explorer 5*
- *bin2mat*
- *Signal\_Converter\_v1\_0*
- *VirtualDub*
- *EGD-reader*
- *Ulef DVD MovieFactory*

## Лабораторная работа №3

### Коронный разряд в симметричной системе электродов

Работа посвящена изучению и экспериментальному исследованию электрофизических процессов коронного разряда в симметричной системе электродов игла-игла.

#### 1. Цель работы

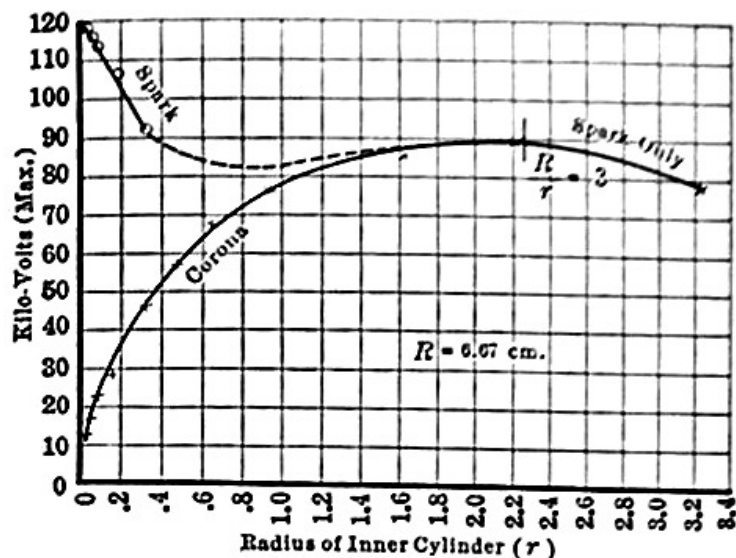
В данной работе предлагается провести исследование коронного разряда в симметричной системе электродов игла-игла. Необходимо получить вольтамперные характеристики разряда, определить напряжения зажигания самостоятельного разряда, подробно описать наблюдаемые в эксперименте формы коронного разряда.

#### 2. Предварительные сведения

##### Коронный разряд

Ф.Пик [1] исследовал высоковольтные явления, начиная от миниатюрного коронного разряда, заканчивая гигантскими молниями.

На примере системы концентрических цилиндров Пик показал, что при резко неоднородном электрическом поле напряжение зажигания коронного разряда существенно ниже напряжения искрового пробоя (рис.2.1).



**Рисунок 2.1.** Напряжение зажигания коронного разряда (сплошная линия) и напряжение возникновения искрового пробоя межэлектродного промежутка в системе электродов цилиндр в цилиндре в зависимости от радиуса внутреннего цилиндра [1].

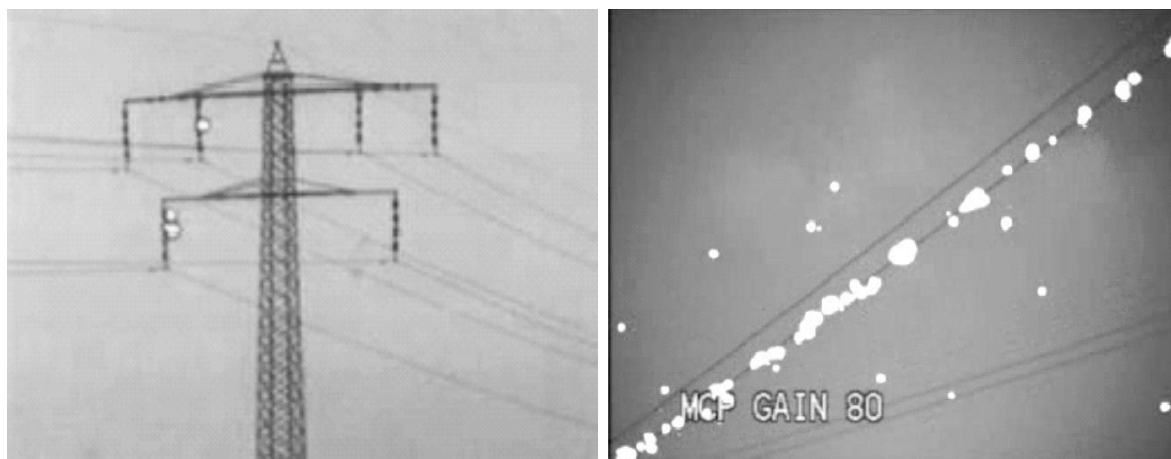
Пиком были получены формулы для расчёта напряжённости электрического поля  $E_0$  у коронирующего электрода и напряжения на межэлектродном промежутке  $U_0$  в момент зажигания коронного разряда в системе коаксиальных цилиндров:

$$E_0 = 30,3 \cdot \delta \left( 1 + \frac{0,298}{\sqrt{r_0 \delta}} \right), \quad (2.1)$$

где  $r_0$  – радиус внутреннего цилиндра,  $\delta$  – относительная плотность среды в межэлектродном промежутке,  $\delta \sim P$ ,  $P$  – давление. Для атмосферного давления  $\delta = 1$ ;

$$U_0 = E_0 r_0 \ln \frac{R}{r_0},$$

где  $R$  – радиус внешнего цилиндра.



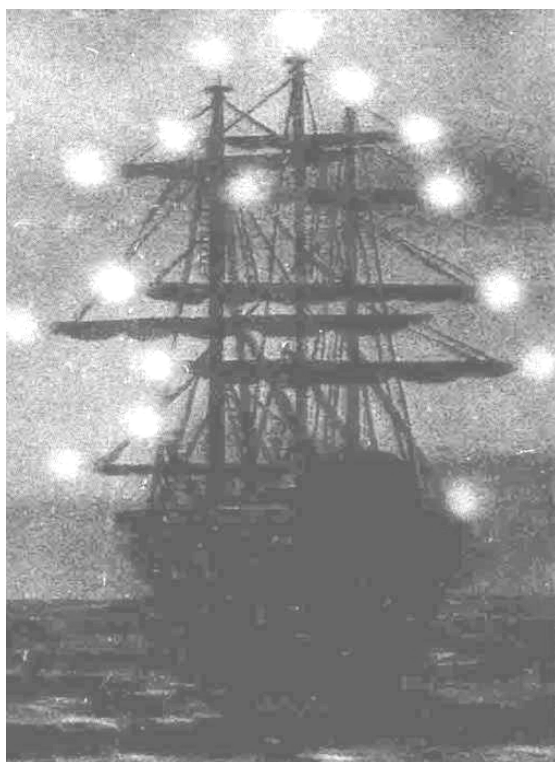
**Рисунок 2.2.** Корона на линиях электропередач.

Корона – слаботочный слабосветящийся разряд – появляется в окрестности острия, проволоки, где электрическое поле резко усилено. Только в этой зоне происходит ионизация и газ светится. Электрический ток замыкается потоком зарядов того или иного знака, в зависимости от полярности острия, которые рождаются в самоподдерживающейся зоне вблизи острия и вытягиваются уже относительно слабым полем к другому электроду. Во внешней области свечения нет. В воздухе корона обычно возникает при давлениях порядка атмосферного около проводов высоковольтных линий (рис.2.2), около громоотводов и мачт кораблей (рис.2.3) («огни святого Эльма»). Для зажигания короны требуется определенное достаточно высокое напряжение, которое зависит от



конкретных условий. При более высоком напряжении пробивается оставшая часть промежутка и между электродами проскакивает искра.

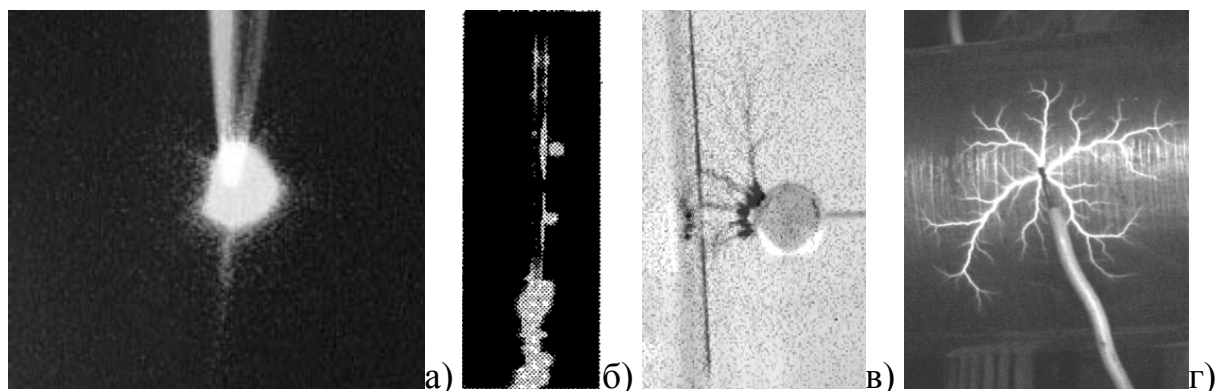
Коронный разряд как физическое явление известен достаточно давно. Коронный разряд – это самостоятельный электрический разряд, при котором ионизация газа электронами происходит не по всей длине промежутка, а в ограниченной области. Поскольку он является одним из видов электрического разряда в газе, то классификация форм коронного разряда осуществляется по тем же принципам, что и общая классификация электрических разрядов.



*Рисунок 2.3. «Огни святого Эльма» наблюдаются на концах мачт кораблей.*

Само название «коронный» разряд получил из-за своего свечения, наблюдаемого на тонких проводах и напоминающего солнечную корону (рис.2.4, а).

Основными формами коронного разряда являются лавинная и стримерная. Названия этих форм обусловлены основными характерными процессами, которые имеют место в зоне ионизации соответствующих коронных разрядов.



**Рисунок 2.4.** *Формы коронного разряда: а – лавинная форма на острие иглы, б – лавинная форма на проволоке, в – стримерная форма на цилиндрическом электроде (негатив), г – стримерная форма на конце проволоки.*

На фотографиях (рис.2.4) представлены лавинная и стримерная формы коронного разряда на игольчатом электроде. Слева (рис.2.4, а) представлена фотография игольчатого электрода. На следующей фотографии (рис.2.4, б) лавинная форма на шероховатом проволоочном электроде. Стримерная корона (рис.2.4, в,г) наблюдается в виде слабосветящихся нитевидных каналов, длина которых, в зависимости от конкретных условий, может изменяться в широких пределах от нескольких миллиметров до десятков сантиметров.

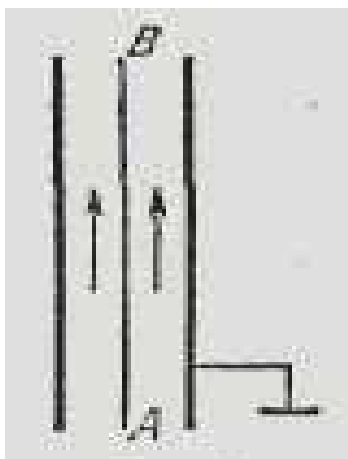
Как уже отмечалось, корона иногда возникает и в естественных условиях под влиянием атмосферного электричества на верхушках деревьев, корабельных мачт и т.п. Это явление в старину получило название «огни святого Эльма» (рис.2.3). Часто корона возникает вблизи высоковольтных линий (рис.2.2). С возникновением коронного разряда приходится считаться в технике высоких напряжений. Образуюсь вокруг проводов высоковольтных линий передач электроэнергии, корона ионизует окружающий воздух, вследствие чего возникают очень вредные токи утечки. Для уменьшения этих токов провода высоковольтных линий, а также подводящие провода к высоковольтным лабораторным установкам должны быть достаточно толстыми. Коронные разряды, поскольку они носят прерывистый импульсный характер, являются источниками значительных радиопомех.

Коронный разряд оказывает не только вредное воздействие, как в линиях электропередач, он находит и полезное применение, например, в электрофильтрах, электросепараторах, лежит в основе работы счетчиков Гейгера-Мюллера (1929 г.), предназначенных для регистрации ядерных частиц.

В наши дни коронный разряд широко применяется в технике, а именно для электрогазоочистки, электроокраски, напыления порошковых

покрытий, используется для модифицирования свойств поверхности, при струйной электропечати и других отраслях промышленности.

Очень широко коронный разряд используется в электрофильтрах, предназначенных, в частности, для очистки промышленных газов от примесей твердых и жидких частиц, например, частиц дыма в производстве серной кислоты, в литейных цехах заводов цветных металлов и пр. Упрощенный принцип действия такого электрофильтра поясняется на рисунке (рис.2.5). Вдоль оси вертикальной трубы натянута заряженная, например, отрицательно проволока АВ, вокруг которой зажигается коронный разряд. Вследствие этого воздух внутри трубы становится сильно ионизованным. Ионы оседают на частицах дыма, поднимающегося вверх по трубе. Получив заряды, одноименные с зарядом коронирующей проволоки, частицы дыма отталкиваются от нее и оседают на стенках трубы. Отсюда они могут быть извлечены механическим способом и использованы для дальнейшей переработки, например, для получения содержащихся в них ценных продуктов.



*Рисунок 2.5. Принцип действия электрофильтра (пояснения в тексте).*

Коронный разряд возникает при сравнительно высоких давлениях газа (порядка атмосферного) в сильно неоднородном электрическом поле. Такое поле можно получить между двумя электродами, поверхность одного из которых обладает большой кривизной (тонкая проволочка, острие). Наличие второго электрода не обязательно, его роль могут играть окружающие заземленные электроды.

Рассмотрим начало зажигания коронного разряда. На начальном этапе можно считать, что электрическое поле, создаваемое объёмным зарядом свободных электронов и ионов, пренебрежимо мало по сравнению с полем электродов. В этом случае можно говорить об электростатическом приближении и считать, что электроны движутся исключительно под действием внешнего электрического поля.

Для расчёта коронного разряда в электростатическом приближении необходимо знать такие величины как:

- Длину ионизации электрона – среднее расстояние, проходимое электроном по полю до первого акта ионизации,
- Энергию ионизации нейтральной частицы – работа необходимая для отрыва электрона от внешней оболочки атома и ли молекулы.

Для оценки ближней зоны коронного разряда сравним энергию ионизации нейтральной молекулы  $A_{ион}$  и энергию набираемую электроном на расстоянии ионизации  $W(x)$ , где  $x$  – это координата вдоль силовой линии электрического поля,  $E$  – напряжённость электрического поля:

$$A_{ион} \leq W(x) = \int_{x-l}^x E(t)dt = E(x_0)l ,$$

где  $x-l \leq x_0 \leq x$ . Можно использовать приближенную формулу:

$$A_{ион} \leq W(x) \approx E(x)l .$$

Данная формула позволяет давать оценки для размера ближней зоны коронного разряда только в момент его зажигания.

Когда электрическое поле у электрода с большей кривизной достигает величины примерно 24,6 кВ/м, а это условие выполняется только вблизи электрода с малым радиусом кривизны, вокруг этого электрода возникает свечение, имеющее вид оболочки или короны, откуда и произошло название разряда. Если корона возникает вокруг отрицательного электрода, то она называется отрицательной. В противоположном случае корона называется положительной. Механизм возникновения разряда в этих двух случаях разный.

В случае отрицательной короны положительные ионы, которые образуются электронными лавинами, ускоряются в сильно неоднородном электрическом поле у катода. Попадая на катод, они выбивают из него электроны, это называется вторичной электронной эмиссией. Выбитые электроны, отталкиваясь от катода, на своем пути порождают новые электронные лавины. Так как электрическое поле убывает при удалении от электрода, то на некотором расстоянии электронные лавины обрываются, электроны попадают в «темную» область и там прилипают к нейтральным молекулам газа. Образовавшиеся отрицательные ионы и являются основными носителями тока в «тёмной» области. Пространственный отрицательный заряд этих ионов вблизи анода ограничивает общий разрядный ток.

В случае чистых электроположительных газов отрицательные ионы не образуются, а носителями тока в «темной» области являются сами электроны. В «темной» области разряд носит несамостоятельный характер.

В положительной короне, когда катодом служит электрод с большим радиусом кривизны, электрическое поле у катода слабое. Поэтому электронные лавины не могут порождаться электронами, выбиваемыми из катода вследствие вторичной эмиссии. Электронные лавины порождаются электронами, возникающими около анода при объемной ионизации газа фотонами, излучаемыми коронирующим слоем. Они зарождаются на внешней границе коронирующего слоя и распространяются к положительному электроду, обладающему большой кривизной. Положительные ионы, двигаясь через «темную» область к катоду, образуют пространственный заряд, который снова ограничивает силу разрядного тока.

При увеличении напряжения между электродами «темная» область коронного разряда исчезает и возникает искровой разряд с полным пробоем разрядного промежутка.

### ***Потери на корону в высоковольтных линиях.***

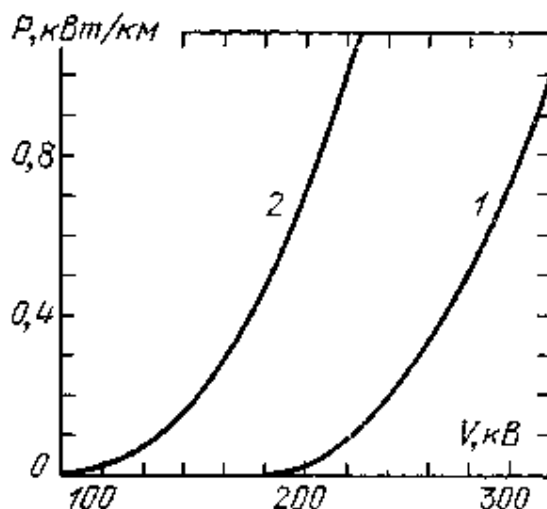
Этот вопрос очень важен для электроэнергетики. Потери на корону могут оказаться сравнимыми с потерями на выделение джоулева тепла в проводах. Когда коронируют оба электрода, как в случае параллельных проводов противоположной полярности, ток во внешней зоне между ними переносится движущимися навстречу ионами разных знаков. Ток и потери энергии в такой биполярной короне гораздо сильнее, чем в униполярной короне с одним коронирующим электродом. Полной рекомбинации ионов обычно не происходит, а взаимная нейтрализация пространственного заряда снижает степень ограничения тока, ограниченного пространственным зарядом. Кроме того, отрицательные ионы, пройдя к положительному проводу, распадаются в его сильном поле. Это служит дополнительным источником электронов и несколько облегчает зажигание разряда. Для случая двух параллельных проводов по Пику [1] напряжённость электрического поля, при которой происходит зажигание коронного разряда, составляет:

$$E_k = 29.8 \cdot \delta \left( 1 + 0.031 / \sqrt{\delta \cdot r} \right) \text{ кВ/см,}$$

при  $r < 1$  см, что несколько меньше, чем для одного электрода (2.1).

Отметим, что половина напряжения зажигания коронного разряда между двумя проводами оказывается примерно на 10 процентов меньше, чем между одним проводом и плоскостью посередине, хотя в отсутствие разряда, т.е. в электростатическом отношении, обе ситуации эквивалентны.

На рис.2.6 представлены потери мощности на 1 км длины для проводов линии высокого напряжения диаметром 2,5 см. В дождливую погоду, зимой напряжение зажигания значительно уменьшается, так как капельки дождя, кристаллики льда, осевшие на проводах, создают дополнительные источники усиления поля. Ток утечки и потери при том же напряжении резко возрастают.



**Рисунок 2.6.** Потери мощности на 1 км длины при короне для провода диаметром 2,5 см как функция напряжения: 1—слабый дождь, 2 — хорошая солнечная погода.

### **Объёмный электрический заряд**

В процессе ионизации в чехле коронного разряда образуются отрицательные электроны и положительные ионы, которые разносятся электрическим полем в противоположные направления. Вследствие этого возможно образование объёмного заряда, который образует собственное электрическое поле. Основную часть пространства между электродами, при униполярном коронном разряде, занимает внешняя область, в которой движутся ионы только одного знака. Чехол коронного разряда, в котором сосредоточены ионизационные процессы, играет роль поставщика ионов для внешней зоны.

### **Электрический ветер**

При коронном разряде наблюдается гидродинамическое движение среды в целом. Это явление получило название электрического ветра.

Во внешней области коронного разряда находится объёмный заряд, движущийся от коронирующего электрода к противоположному. Ионы, сталкиваясь с молекулами воздуха, передают им некоторый импульс и энергию. В результате нейтральные молекулы воздуха приходят в

движение, образуя гидродинамическое движение среды, которое и называют электрическим ветром.

Сила, действующая на объёмный заряд, равна  $E \cdot \rho$ , где  $E$  – напряжённость поля,  $\rho$  – плотность объёмного заряда. Поскольку скорость движения ионов в воздухе много меньше соответствующей скорости в вакууме, можно считать, что практически вся энергия, получаемая ионами от поля, передаётся нейтральной среде. Сила, действующая на объёмный заряд, по существу, действует на среду в целом. Таким образом, явление электрического ветра является движением среды в поле объёмных сил.

Движение заряженных микрочастиц в поле коронного разряда определяется как действием поля на заряженные частицы, так и их переносом под действием электрического ветра. Роль этих процессов различна при различных условиях. В некоторых случаях можно выделить основной, определяющий процесс, но иногда приходится учитывать оба. Например, движение очень маленьких частиц (менее 1 мкм) определяется электрическим ветром, для частиц промежуточного размера (1÷80 мкм) необходимо учитывать оба фактора, только для больших частиц (более 80 мкм) можно пренебречь влиянием электрического ветра.

Исследование электрического ветра представляет достаточно сложную экспериментальную задачу – при измерениях не должны искажаться ни гидродинамические движения, ни распределение электрического поля. Помимо этого требуется точная локализация измерений, поскольку потоки, в основном, носят струйный характер с высокими скоростями и большими градиентами скоростей. Также необходимо учитывать турбулентный характер движения. Наиболее перспективными методами в этом направлении считаются: метод визуализирующих частиц, метод траекторий и методы, основанные на эффекте Доплера. По нашим данным электрический ветер возникает одновременно с короной и скорости электрического ветра составляют 1÷5 м/с.

В теоретическом плане задача крайне сложна и на данный момент не решена, поэтому широко используются приемы компьютерного моделирования коронного разряда и электрического ветра.

### ***Прерывистая корона.***

При некоторых условиях коронный разряд, несмотря на постоянство напряжения, горит в виде периодических импульсов тока с частотами повторения до  $10^4$  Гц, если коронирует анод, и до  $10^6$  Гц, если катод. Прерывистые явления были обнаружены Тричелем и Кипом (1938г.) в лаборатории Леба. Леб и его школа внесли большой вклад в изучение искрового и коронного разрядов. Периодические эффекты представляют и практический интерес. Частоты их лежат в радиодиапазоне, и корона в линиях передач может оказаться источником радиопомех. Для

лабораторного изучения особенно удобна корона с острием на плоскость в воздухе комнатной температуры.

### **Положительное острие.**

Приведем результаты типичного эксперимента. В случае острия радиуса  $r = 0,17$  мм на расстоянии  $d = 3,1$  см от плоского катода корона появляется при напряжении  $V_K \sim 5$  кВ и вплоть до напряжения  $V_1 \sim 9,3$  кВ имеет импульсный характер. У краев интервала  $V_K - V_1$  частота повторения мала, а в середине достигает максимальной величины  $6,5$  кГц. Средний ток нарастает до  $1$  мкА при  $V_1$ . Подобные импульсы называют вспыхивающей короной. В интервале от  $V_1$  до  $V_2 \sim 16$  кВ импульсов нет. Идет стационарный ток. Он нарастает от  $1$  до  $10$  мкА при  $V_2$ . Начиная от  $V_2$  и вплоть до напряжения искрового пробоя всего промежутка  $V_i \sim 29$  кВ разряд снова протекает в форме импульсов. Частота их монотонно возрастает от малого значения до  $4,5$  кГц. Нарастающий с напряжением средний ток достигает в предпробойной стадии величины  $100$  мкА.

Вспыхивающая корона при небольших превышениях напряжения над  $V_K$  связана с так называемыми предначальными стримерами. Возникающие в результате ионизации электроны втекают в острие-анод, а вне узкой зоны, где разыгрываются процессы ионизации и появляются стримеры, накапливается пространственный заряд положительных ионов. Окружающий острие положительный слой создает поле, которое с внутренней стороны слоя направлено против внешнего поля, т.е. ослабляет поле острия, экранирует его. Новые стримеры уже не образуются, ток падает. По мере вытягивания ионов к катоду сильное поле у острия восстанавливается, острие «обнажается». Появляются стримеры, новый всплеск ионизации, ток, и все начинается снова. Нечто подобное происходит и на втором импульсном участке  $V_1 - V_2$ , только с предпробойными стримерами. В интервале  $V_1 - V_2$  условие самоподдержания выполняется стабильно и течет постоянный ток. Ток между пиками вспыхивающей короны падает не до нуля, он обладает и постоянной составляющей.

### **Отрицательное острие.**

В некотором интервале напряжений и средних токов, начиная от точки зажигания коронного разряда  $V_K$ , ток имеет импульсный характер. Частота импульсов больше, чем в положительной короне,  $10^5$  Гц при  $20$  мкА, а сами импульсы короче ( $10^{-7}$  с) и их амплитуда выше: пиковый ток достигает  $10$  мА. Импульсы имеют очень регулярный характер. Их называют импульсами Тричеля. При повышении напряжения импульсы исчезают, и стационарная корона существует вплоть до искрового пробоя промежутка.



Причина нестационарных явлений, в принципе, та же, что и в случае положительной короны, хотя и есть особенности. При росте лавин от острия–катода около острия располагается положительный пространственный заряд, а немного дальше – отрицательный. Если это электроны, они быстро вытягиваются к аноду, а плотность отрицательного заряда очень низка. Экранирующего действия на поле острия этот заряд не оказывает. Присутствие положительных ионов в непосредственной близости от острия только усиливает там поле. Поэтому в электроположительных газах ( $N_2$ , Ar) импульсы Тричеля не обнаруживаются. Другое дело воздух, там электроны, чуть удалившись от острия, попадают в более слабое поле и прилипают к молекулам. Пространственный заряд отрицательных ионов ослабляет поле острия, размножение лавин и ток затухают. По мере вытягивания отрицательных ионов к аноду, а положительных на острие, внешнее поле восстанавливается, и создаются условия для нового импульса.

Коронный разряд является самостоятельной формой разряда. Зажигание самостоятельного разряда описывается двумя основными схемами [2]:

- Пробой по Таунсенду – в основе лежит размножение лавин в результате вторичной эмиссии. Критерий применения  $pd < 200$  Тор·см.
- Стримерный пробой – в основе лежит размножение лавин, образовавшихся из вторичных электронов выбитых фотонами вблизи следа первичной лавины. Критерий применения  $pd > 4000$  Тор·см.

Коронный разряд может быть реализован в каждом из случаев. При этом наблюдаются различные формы коронного разряда: *лавиная* и *стримерная*, соответственно.

В обеих схемах пробой предшествует прохождению первичной лавины, образовавшейся из первичного электрона.

Наличие свободных электронов в воздухе при естественных условиях определяется космическим излучением и естественным радиационным фоном, под действием которых в воздухе происходит образование свободных электронов, атомных и молекулярных ионов. За счёт естественной ионизации в воздухе в среднем в кубическом сантиметре содержится  $10^3$  пар ионов. Скорость естественной ионизации около 10 пар ионов за секунду в кубическом сантиметре.

В однородном электрическом поле происходит экспоненциальный рост плотности свободных электронов  $n = n_0 \cdot e^{\alpha \cdot d}$ . Коэффициент  $\alpha$  называется коэффициентом ударной ионизации или первым ионизационным коэффициентом Таунсенда. Для примера в воздухе при нормальных условиях  $\alpha = 18 \cdot \text{см}^{-1}$  при 30 кВ/см. Детальное описание лавинной ионизации можно найти во многих учебниках, например в [2].

Свободный электрон разгоняется в электрическом поле. В случае если он перед столкновением успевает набрать энергию достаточную для

ионизации нейтральной частицы, называемую *энергией ионизации*, то при столкновении происходит рассеяние с ионизацией. После ионизации в объёме присутствуют уже два электрона и положительный ион. Теперь в объёме находится два свободных электрона, для которых процесс повторяется. Данный процесс носит название *электронной лавины*.

### **Таунсендовский пробой**

В неоднородном электрическом поле действуют те же закономерности что и для кривой Пашена, но в формулы вносятся небольшие изменения. Сделаем ряд приближений, не будем учитывать потери электронов в результате рекомбинации с положительными ионами и захватом нейтральными атомами. Также не учитываем космическое излучение, поскольку нас интересует собственно самостоятельный разряд. Скорость нейтральных атомов много меньше скорости электронов и мы считаем их неподвижными. Рассчитаем рождение электронов в результате ударной ионизации:

$$\frac{dn_e}{dt} = \int n_e(\varepsilon) d\varepsilon v(\varepsilon) \sigma(\varepsilon) n_0 = \nu_i n_e \Rightarrow n_e = n_e^0 e^{\int \nu_i dt},$$

где  $n_e$  – концентрация электронов,  $n_e(\varepsilon)$  – распределение концентрации электронов по энергии,  $v(\varepsilon)$  – скорость электрона,  $\sigma(\varepsilon)$  – сечение ионизации атома электронным ударом,  $n_0$  – концентрация нейтральных атомов,  $\nu_i$  – частота электрон-атомных столкновений, сопровождающихся ионизацией последнего

Пересчитаем развитие электрона в пространстве:

$$\frac{dn_e}{dt} = \frac{dn_e}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dn_e}{dx} v_{dp} = \nu_i n_e \Rightarrow n_e = n_e^0 e^{\int \nu_i / v_{dp} dx},$$

где  $v_{dp}$  – дрейфовая скорость электронов в поле.

Перейдём к терминам тока:

$$j_e = j_e^0 e^{\int \nu_i / v_{dp} dx} \Rightarrow j_- = j_e^0 e^{\int \nu_i / v_{dp} dx} - j_e^0 = j_e^0 \left( e^{\int \nu_i / v_{dp} dx} - 1 \right),$$

где  $j_e$  – поток электронов,  $j_e^0$  – поток электронов у катода,  $j_-$  – поток отрицательных ионов.

Критерием самостоятельности разряда будет то, что в результате вторичных процессов на катоде, будет имитирован ток электронов не меньше того, что вызвал эти процессы:

$$j\gamma \geq j_e^0 \Rightarrow \gamma \left( e^{\int \frac{v_i}{v_{dp}} dx} - 1 \right) \geq 1 \Rightarrow \int \frac{v_i}{v_{dp}} dx \geq \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right),$$

где  $\gamma$  – коэффициент ион-электронной эмиссии на катоде.

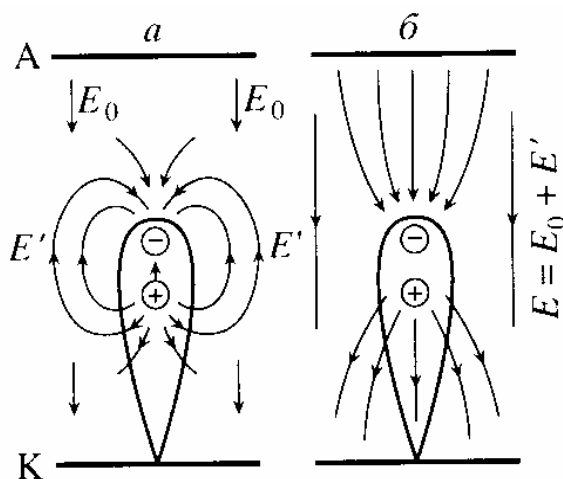
Мы получили критерий зажигания Таунсендовского самостоятельного разряда, в сильно неоднородном электрическом поле это критерий зажигания лавинной формы коронного разряда:

$$\int \frac{v_i}{v_{dp}} dx \geq \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right),$$

где  $v_i / v_{dp} = \alpha(E)$  – первый ионизационный коэффициент Таунсенда.

### **Стримерный пробой**

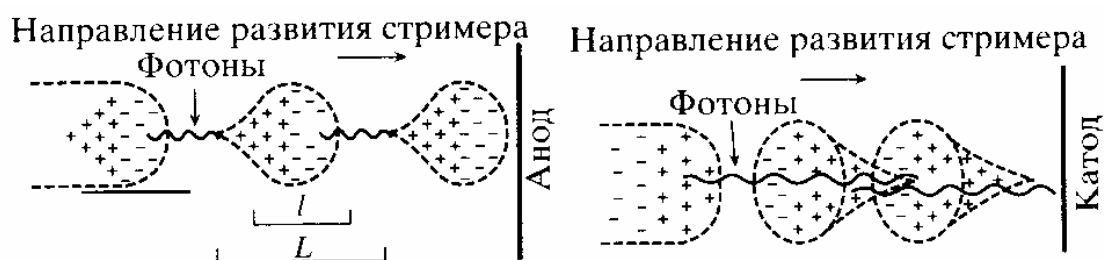
Для развития стримерного пробоя также необходима первичная лавина. О переходе к стримерному пробую говорится в случае, когда поле лавины существенно искажает внешнее электрическое поле (рис.2.7). Согласно [8] об этом можно говорить, когда количество электронов в лавине превосходит  $10^8$ . При этом поле внутри головки лавины ослабевает, а поле позади и перед лавиной усиливается. Такое распределение пространственно заряда обусловлено тем, что более подвижные электроны увлекаются внешним полем, в то время как более тяжёлые и менее подвижные ионы практически остаются неподвижными.



**Рисунок 2.7.** Схематическое изображение полей в присутствии электронной лавины, а) – линии напряжённости внешнего поля  $E_0$  и поля объёмного заряда  $E'$  по отдельности, б) – линии напряжённости результирующего поля  $E = E_0 + E'$ . Кружками условно обозначены центры пространственных зарядов [8].

Вторичные электроны возникают за счёт фотоионизации газа. Именно процесс фотоионизации объясняет тот факт, что скорость распространения плазменного образования существенно превосходит скорость дрейфа. Схема распространения стримера, по теории фотоионизации, представлена на рисунке (рис.2.8).

Может возникнуть иллюзия что, зародившись, стример может распространяться без внешнего поля, но это не так. Для распространения стримера требуется производить ионизацию газа, для этого требуется энергия, которую можно почерпнуть только извне, т.е. от внешнего поля.

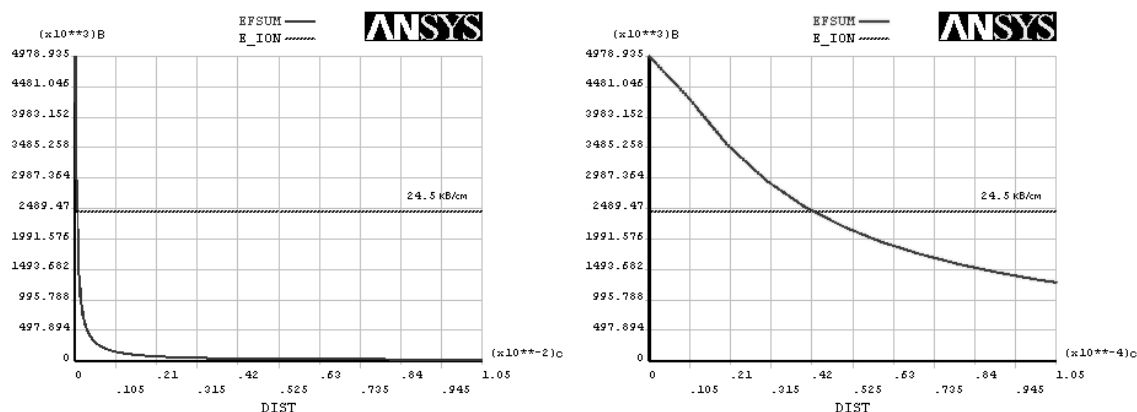


**Рисунок 2.8.** Схема распространения положительного стримера (слева) и отрицательного стримера (справа) [8].

### **Оценка расположения и размеров зоны ионизации в условиях эксперимента.**

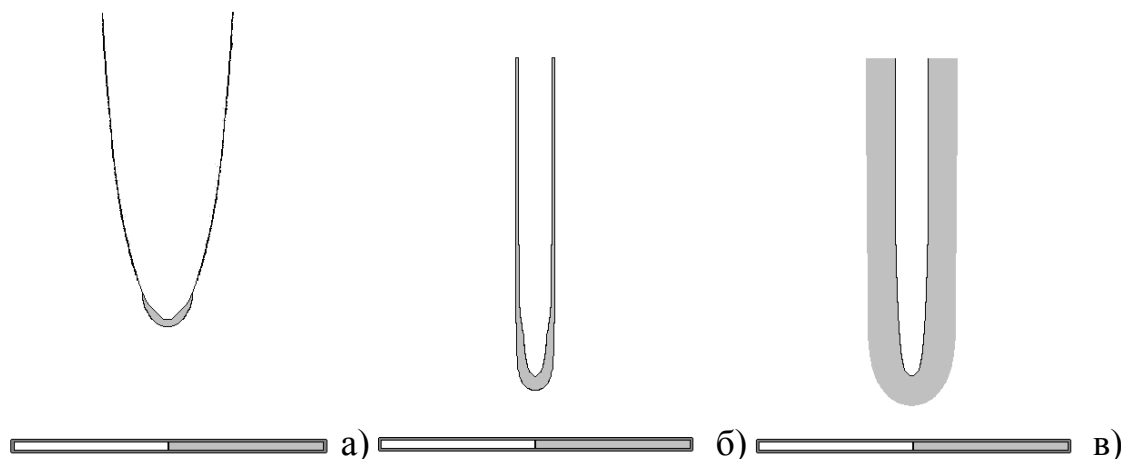
Оценка расположения и размеров зоны ионизации в условиях эксперимента проводится путем расчета напряженности поля в электростатическом приближении. Для проведения этих оценок необходимо использование максимально близких геометрий. Заметим, что игольчатые электроды не всегда имеют правильную форму, например, иногда они имеют срезанное остриё, что может повлиять на расчеты распределения напряжённости поля. Поэтому целесообразно при расчётах использовать геометрическую модель игольчатого электрода, восстановленную по фотографиям электрода. Для этого предлагается специальная программа (Приложение 2) обработки фотографий, написанная в среде *MatLab*. Там же производился синтез командного файла на языке *APDL*, который «руководит» расчетами и выводом результатов в программном комплексе *ANSYS*.

Для предварительной оценки расположения и размеров зоны ионизации полезно рассмотреть несимметричный случай с правильной формой иглы.



**Рисунок 2.9.** Распределение напряжённости электрического поля вдоль оси, при напряжении 1кВ. Справа – весь межэлектродный промежуток, слева – 1% от длины межэлектродного промежутка со стороны электрода-«иглы».

Внешняя граница зоны возможной ударной ионизации молекул воздуха определяется исходя из неравенства  $E > E_{\text{лавиного пробоя}} = 24,5 \text{ кВ/см}$ . На рис.2.9 представлен пример распределения напряженности поля вдоль оси симметрии модели. Видно, что оценочный размер ближней зоны коронного разряда составляет 40 мкм при напряжении в 1 кВ. Ближние зоны коронного разряда представлены на рис.2.10.



**Рисунок 2.10.** Оценочная форма ближней зоны коронного разряда, рассчитанная в электростатическом приближении. Серым цветом выделена область, в которой возможно лавинное размножение электронов: (а) – напряжение 1 кВ (относительно других рисунков увеличен в 5 раз), (б) – напряжение 4 кВ, (в) – напряжение 10 кВ.

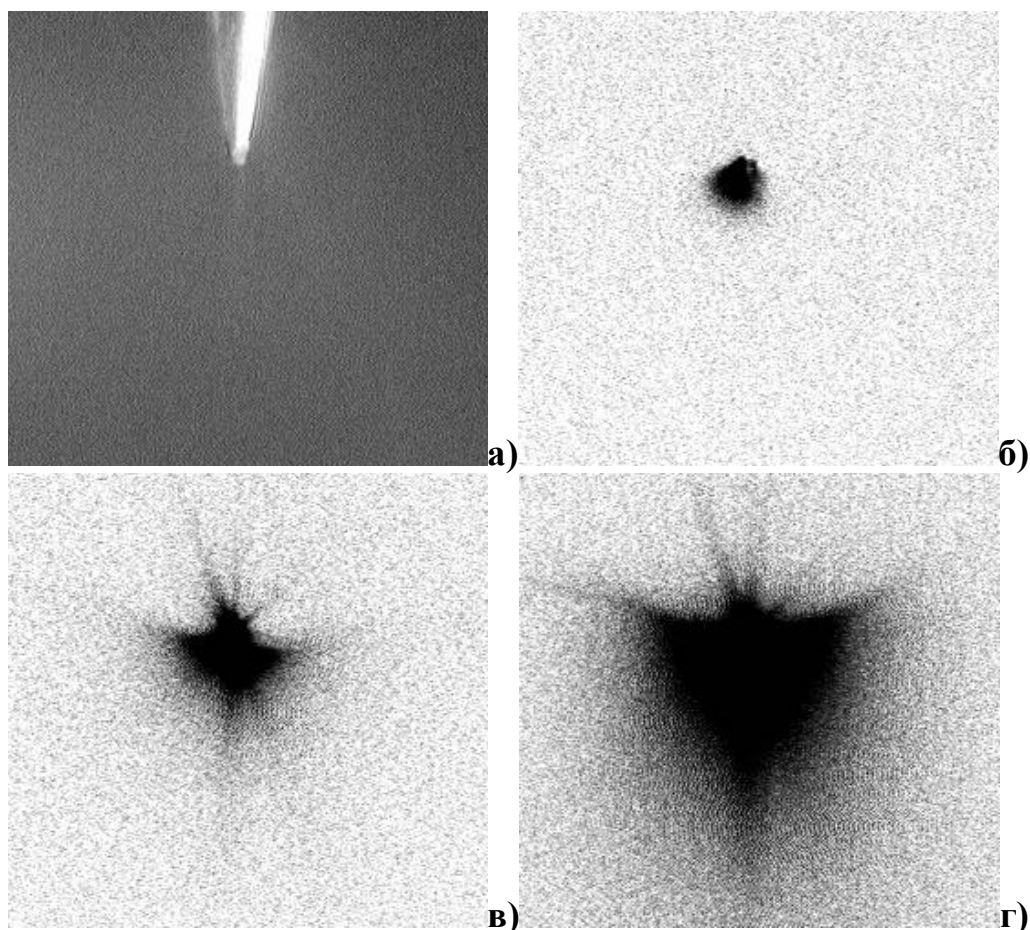
## **Результаты экспериментальных исследований в несимметричной системе электродов**

### **Система электродов «игла-плоскость».**

В качестве электрода плоскость использовалась или торец металлического цилиндра или часть сферы большого радиуса. Результаты экспериментов показали несущественный вклад краевых эффектов и хорошую идентичность этих систем, в дальнейшем мы их различать не будем.

### **Отрицательное напряжение.**

При подаче высокого напряжения отрицательной полярности характерно горение лавинной формы коронного разряда. Оно наблюдается во всём исследуемом диапазоне давлений  $0,5 \div 1,0$  атм. для напряжений до 20 кВ.

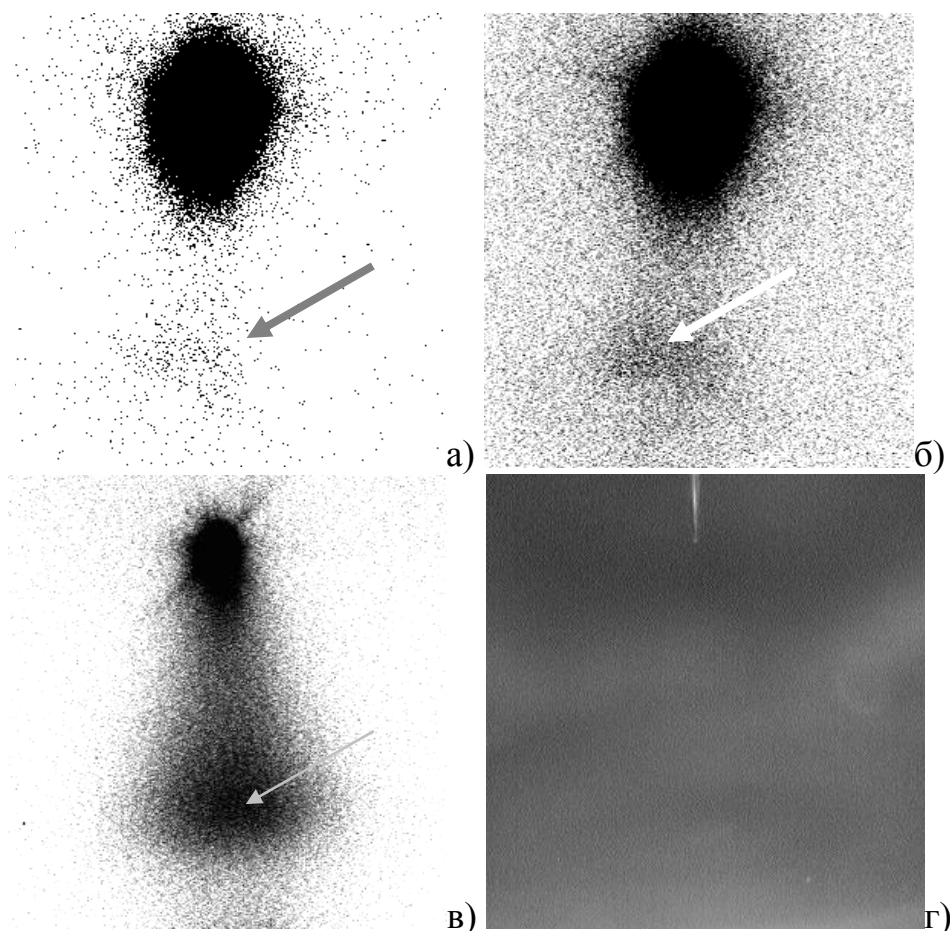


**Рисунок 2.11.** Фотографии отрицательного коронного разряда: а) – форма электрода без подачи напряжения, б) – негатив фотографии коронного разряда (4,7 кВ, 2 мкА), в) – негатив фотографии коронного разряда (12,1 кВ, 29 мкА), г) – негатив фотографии коронного разряда (16,5 кВ, 66 мкА). Напряжение зажигания коронного разряда для данного электрода 4 кВ.

При этом с самого начала зажигания коронного разряда наблюдаются отклонения наблюдаемых размеров и формы чехла короны от рассчитанной в электростатическом приближении, как количественные, так и качественные. Например, напряжение зажигания коронного разряда составляет величину около 4 кВ, а по расчету в электростатике зажигание коронного разряда должно происходить при напряжении примерно 1 кВ. Кроме того, по расчету при напряжении 4 кВ лавинные процессы должны идти на всей боковой поверхности электрода-«игла». Форма чехла коронного разряда также не соответствует электростатическому расчёту, что хорошо видно на фотографиях (рис.2.11).

По мере возрастания напряжения сверх критической величины в межэлектродном промежутке также возникает свечение (рис.2.12). Сначала регистрируется диффузное свечение в объёме над электродом-«плоскость». По мере увеличения напряжения увеличивается яркость объёмного диффузного свечения, и камера регистрирует его по всей длине межэлектродного промежутка. Регистрация межэлектродного диффузного свечения на фоне свечения ближней зоны коронного разряда возможна только при существенном увеличении напряжения, примерно на полпорядка выше напряжения зажигания коронного разряда. В соответствии с расчетами размеры ближней зоны, по-прежнему, значительно меньше размеров светящейся области. Предполагается, что это светятся ионизированные и возбуждённые атомные и молекулярные частицы, образовавшиеся в ближней зоне коронного разряда, которые вместе с нейтральными частицами воздуха сносятся к противоэлектроду *электрическим ветром* [2-6].

В пользу гипотезы о влиянии электрического ветра на снос плазмы из чехла короны в межэлектродный промежуток говорит своеобразная форма светящейся области: на рисунке (рис.2.12) видно, что у противоэлектрода наблюдается уширение области свечения, которое сопровождается увеличением яркости. Это можно объяснить следующим образом: столкнувшись с преградой, струя воздуха растекается по электроду, обеспечивая тем самым снижение скорости в месте столкновения. Как следствие, у нас будет ещё и увеличение яркости свечения, т.к. ионизованные и возбуждённые частички задерживаются у поверхности плоского электрода.

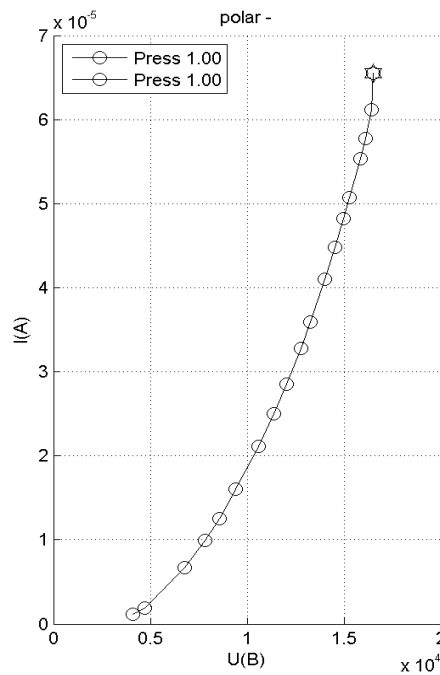


**Рисунок 2.12.** Сдув плазмы в межэлектродный промежуток. Стрелкой указана точка соприкосновения воздушной струи с электродом «плоскость». Негативы фотографий коронного разряда, представлены с различными значениями яркости и контрастности, чтобы максимально выделить «межэлектродное свечение»: а) – напряжение – 15,8 кВ, ток – 55 мкА, б) – 16,1 кВ, 58 мкА, в) – 16,5 кВ, 66 мкА, г) – фотография освещённой кюветы без подачи высокого напряжения.

Необходимо отметить, что при малом изменении напряжения и тока сверх критической величины происходит появление достаточно яркого диффузного свечения в межэлектродной области, но увеличение интенсивности происходит постепенно – нет резкого скачка – нет перехода в другую форму горения коронного разряда, как это происходит при положительной полярности острия.

Также отметим тот факт, что вольтамперная характеристика имеет правильный экспоненциальный характер, и не содержит изломов или скачков (рис.2.13).





**Рисунок 2.13.** Вольтамперная характеристика при отрицательной полярности напряжения.

Отметим, что при появлении диффузного межэлектродного свечения хочется говорить о переходе коронного разряда в высоковольтный тлеющий разряд. Похожие эффекты описаны в работе [7] для системы электродов «игла – сфера». Напомним, что тлеющий разряд (*grow discharge*) – самоподдерживающийся электрический разряд в газе с холодными электродами, имеющий зонную структуру при существенной роли объёмного заряда. В нашем случае зонной структуры не наблюдается.

По-видимому, выявленные отличия от электростатических оценок обусловлены сильным влиянием собственного объёмного заряда чехла «короны». Объёмный заряд в нашем случае не вызывает характерного катодного падения потенциала, а приводит к сносу ионизированного газа электрическим ветром. На рис.2.12 представлен вид плазменного потока, сносимого электрическим ветром. Следует особо отметить, что, несмотря на то, что плазменное образование занимает весь межэлектродный промежуток, это не приводит к формированию стримерного канала. Система достаточно устойчиво работает в этом режиме продолжительное время. Искровой пробой возникает при более высоких напряжениях.

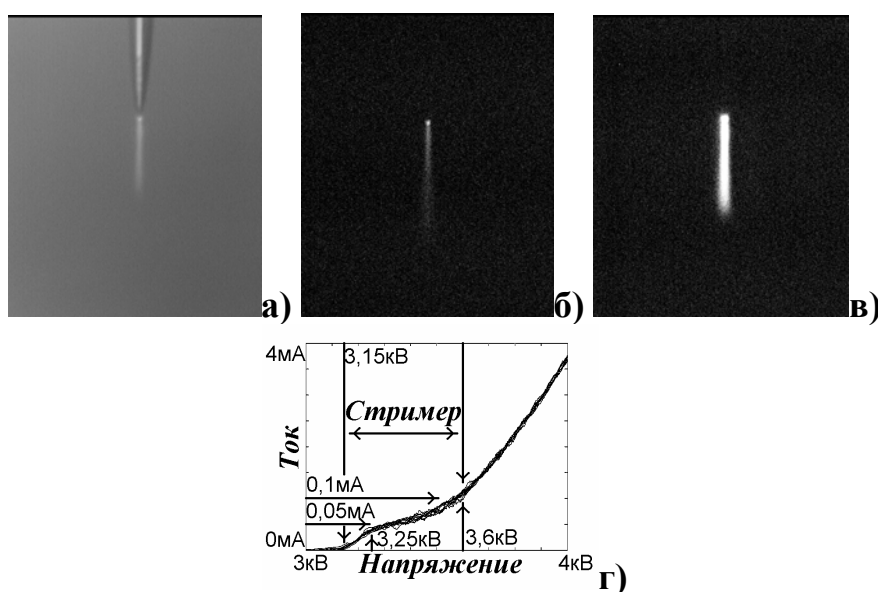
### **Положительное напряжение.**

При подаче положительного напряжения наблюдаются три различных фазы горения коронного разряда. Отметим, что в отличие от отрицательной полярности, существует дискретный переход между различными фазами разряда. При этом эксперименты проводились при тех

же условиях: диапазоне напряжений – до 20 кВ и давления – от 0,5 до 1 атм.

### Фаза №1 (Первичная стримерная форма).

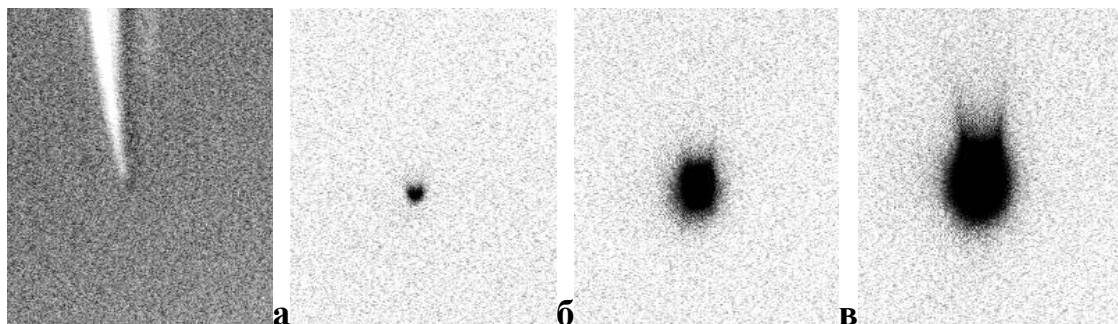
При напряжениях незначительно превышающих напряжение зажигания коронного разряда наблюдается особая форма горения коронного разряда. Сразу отметим, что она не связана с переходными процессами и наблюдается при подаче медленноменяющегося квазипостоянного напряжения. Данная стадия получила название «*первичная стримерная форма*». Этой форме соответствует горение короткого стримерного канала, не замыкающего межэлектродный промежуток (рис.2.14). В наших экспериментах длина *стримера зажигания* была около 2 мм, при длине межэлектродного промежутка 10,5 мм (рис.2.14, а-в). Данной фазе горения разряда соответствует примерно постоянное, слабо растущее значение тока (рис.2.14, г). Для различных образцов электрода существенно различаются как интервалы напряжений, при которых наблюдается данная форма, так и соответствующие токи (наблюдались такие соотношения: интервал напряжений от 0,1 кВ с током насыщения 0,05÷0,1 мкА, до напряжений 0,5 кВ с током насыщения 1 мкА).



**Рисунок 2.14.** Фотографии коронного разряда, в фазе первичной стримерной формы, полученные при различной освещённости и размерах диафрагмы (а)-(в), вольтамперная характеристика коронного разряда в первичной стримерной форме (г). Зажигание коронного разряда происходит при напряжении 3,15 кВ. Вольтамперная характеристика содержит два характерных участка: участок 3,15÷3,25 кВ – фронт первичной стримерной формы, участок 3,25÷3,6 кВ – насыщение по току первичной стримерной формы.

## Фаза №2 (Облегающая лавинная форма).

После переходной фазы наблюдается лавинная форма коронного разряда, но, в отличие от отрицательной полярности, она качественно похожа на рассчитанную в Таунсендовском приближении (рис.2.10). Динамику изменения формы короны при изменении напряжения иллюстрируют фотографии, представленные на рис.2.15.

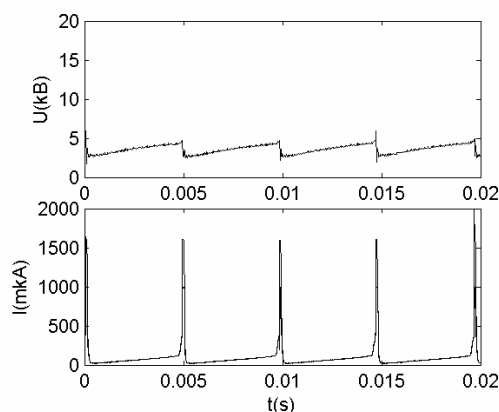


**Рисунок 2.15.** Динамика развития области свечения коронного разряда при положительной полярности: а) – фотография освещённой иглы без напряжения, б) – негатив фотографии короны (3,4 кВ, 0,4 мкА), в) – негатив фотографии короны (6,2 кВ, 3,5 мкА), г) – негатив фотографии короны (9,3 кВ, 10,0 мкА).

Предполагается, что отличие от расчета обусловлено наличием объёмного заряда, который приводит к увеличению зоны ионизации. Это происходит из-за того, что объёмный заряд «сглаживает» спад напряжённости и, поэтому, поле ослабевает до критических значений на большем расстоянии.

## Фаза №3 (Канальная контрагированная форма).

При увеличении подаваемого напряжения возникает переход к контрагированному разряду, который сопровождается резким ростом тока и падением напряжения. При этом наблюдается дрожащий контрагированный канал, замыкающий межэлектродный промежуток. Можно предположить, что во время контракции происходит стримерный пробой межэлектродного промежутка, обрывающийся из-за недостаточной мощности источника питания, после чего происходит подзарядка конденсаторов, до наступления следующего пробоя и т.д. Картина носит периодический характер (рис.2.16).



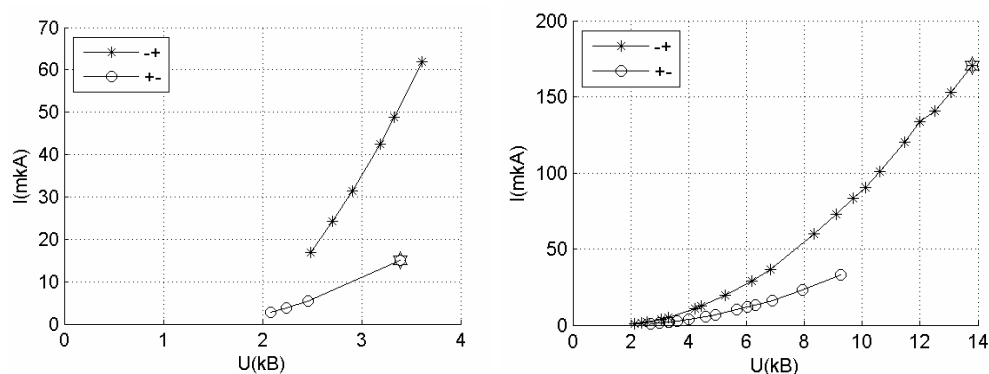
**Рисунок 2.16.** Осциллограммы контрагированной формы разряда в системе «игла-плоскость», при межэлектродном расстоянии 7,5 мм.

В контрагированной форме разряд уже определяется не только электродной системой – на первый план выходят параметры внешней цепи.

### Влияние размеров межэлектродного расстояния на горение разряда.

Эксперименты показали, что в использованном нами диапазоне межэлектродных расстояний наблюдаются следующие закономерности (рис.2.17):

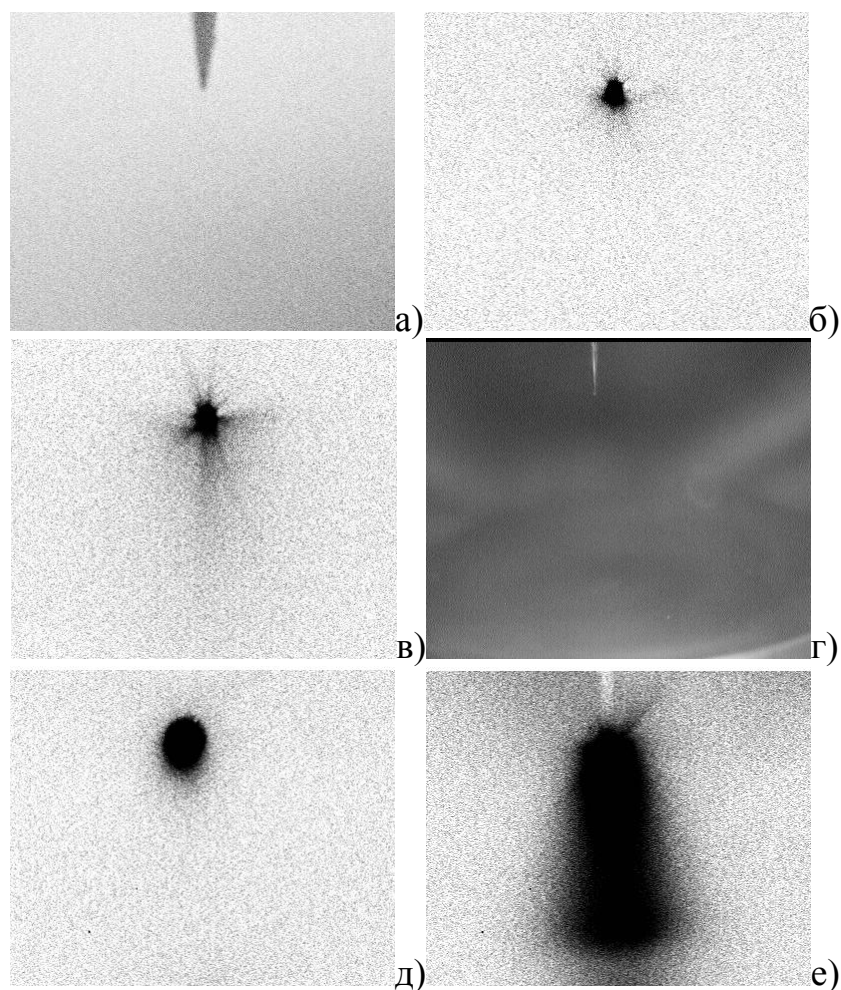
- Напряжение зажигания лавинной формы коронного разряда остаётся неизменным.
- Наблюдается существенный рост напряжения перехода к контрагированной форме разряда, особенно в случае, когда катодом служит игла.



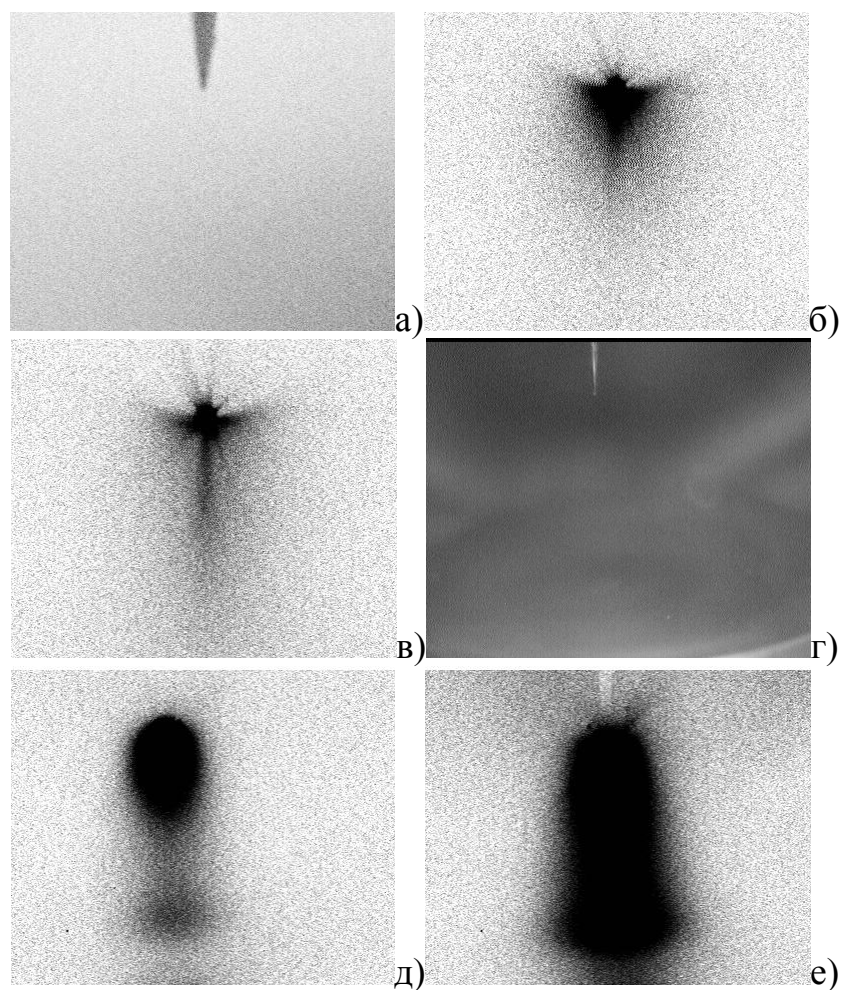
**Рисунок 2.17.** Вольтамперные характеристики системы электродов «игла-сфера». При указании полярности электродов первой указывается полярность электрода-«иглы», второй – полярность электрода-«сферы». Слева кривые ограничены зажиганием коронного разряда, справа – переходом к контракции для межэлектродных расстояний 7,5 мм (а) и 15 мм (б).

### Влияние давления на горение разряда.

При изменении давления в интервале  $0,5 \div 1,0$  атм. качественных изменений коронного разряда не наблюдается, но можно заметить количественные изменения. При изменении давления происходит изменение напряжений, на которых происходят качественные изменения процесса. Таким образом, фиксируя напряжение и изменяя давление можно получить качественно разные картины. Например, при отрицательной полярности и давлении  $0,6$  атм. появление диффузного свечения в межэлектродном промежутке наблюдается при меньших напряжениях, чем при давлении  $1$  атм. (рис.2.18).



**Рисунок 2.18.** Сравнение коронного разряда при фиксированном напряжении  $10$  кВ для разных давлений: а) – фотография электрода, б) – негатив фотографии при атмосферном давлении ( $19$  мкА), в) – негатив фотографии при давлении  $0,6$  атм. ( $60$  мкА), г) - е) – соответствующие кадры сделанные другой камерой.



**Рисунок 2.19.** Сравнение коронного разряда при фиксированном токе 55 мкА для разных давлений: а) – фотография электрода, б) – негатив фотографии при давлении 0,9 атм. (14,5 кВ), в) – негатив фотографии при давлении 0,6 атм. (12,3 кВ), г) - д) – соответствующие кадры сделанные другой камерой.

Рассмотрим влияние понижения давления при фиксированном токе (рис.2.19). Видно, что изменения в горении коронного разряда менее значительные, чем при фиксированном напряжении. Однако становится более заметной, роль электрического ветра, по мере уменьшения давления увеличивается вклад, вносимый электрическим ветром. Об этом свидетельствует изменение формы свечения у электрода-«иглы», а также значительное увеличение яркости диффузного межэлектродного свечения.

Качественно новые изменения в форме горения коронного разряда наблюдаются только при более существенных изменениях давления.

### **Исследование коррозии электродов**

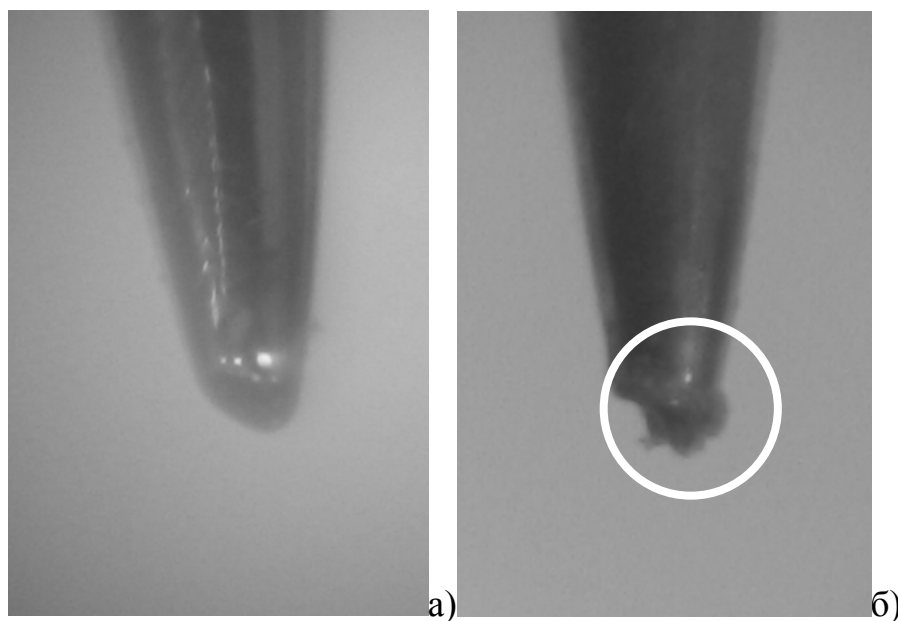
С целью извлечения дополнительной информации можно производить дополнительную фотосъёмку электродов до и после эксперимента. Это позволяет получить дополнительную информацию о

плазмохимических реакциях, происходящих на электроде, и их влиянии на электрод.

После продолжительной работы электродов на них наблюдаются напыления и наросты, очевидно имеющие плазмохимическое происхождение. Форма и влияние изменений происходивших с электродом имели различный характер. Наиболее ярко влияние плазмохимических процессов сопровождающих горение коронно разряда отразилось на двух образцах электрода-«игла».

#### **Игла №1**

Использовалась обычная швейная игла, диаметр 0,88 мм, радиус скругления острия 0,05 мм (рис.2.20).



**Рисунок 2.20.** Фотографии электрода-«иглы», а) – до эксперимента б) – после эксперимента.

По мере работы иглы в экспериментальной установке произошли изменения в процессе горения коронного разряда. На рис.2.21 представлено сравнение вольтамперных характеристик зажигания коронного разряда в начале работы и после длительного горения коронного разряда на электроде (испытания проводились при подаче отрицательного напряжения).



**Рисунок 2.21.** Вольтамперные характеристики электрода-«иглы» в начале работы и после длительного горения коронного разряда.

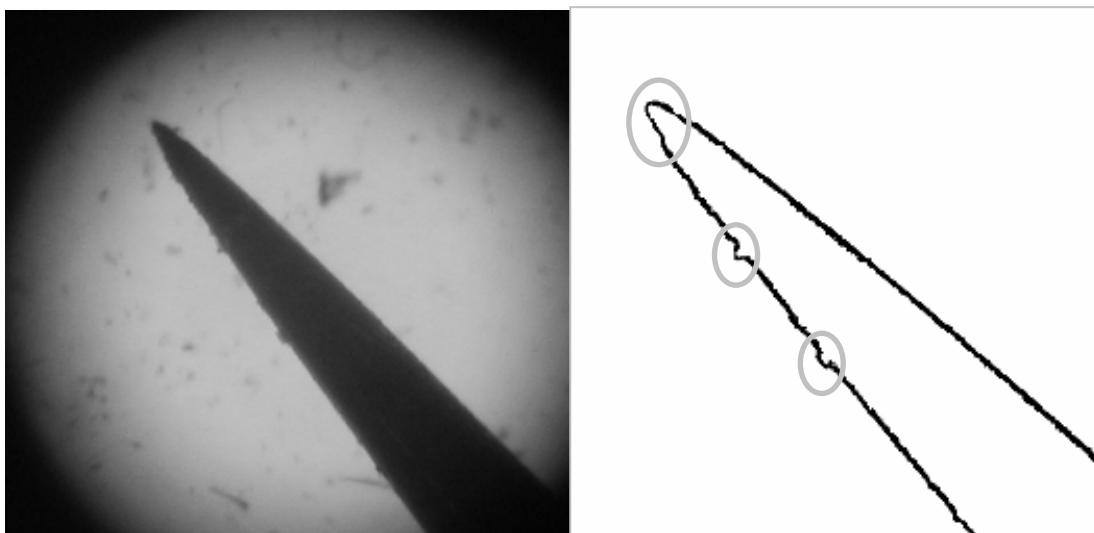
Плазмохимическое образование на электроде внесло следующие изменения в горение коронного разряда:

- Пропал эффект гистерезиса при зажигании коронного разряда.
- Увеличился электрический ток, проходящий через систему электродов.
- Понижилась стабильность горения коронного разряда.

#### **Игла №2**

Использовалась специально заточенная и отполированная игла. После эксперимента, на игле было обнаружено обильное напыление, которое привело к образованию неоднородного покрытия, из-за чего игла выглядела матовой. До эксперимента радиус острия иглы был менее 0,01 мм, после эксперимента он составил величину около 0,02 мм. После коррозии размеры неоднородностей на боковой поверхности электрода-«иглы» достигают размеров 0,02 мм. Заметим, что после работы «степень заточки» электрода полностью определялась коррозионным покрытием. На фотографиях и на результатах их обработки (рис.2.22) видно, что на «степень заточки» электрода определяется образовавшимся наростом, и он крупнее наростов, образовавшихся на боковой поверхности электрода.





**Рисунок 2.22.** Фотография иглы на фоне подсвеченной матовой поверхности(слева) и контур электрода-«иглы» с отмеченными неоднородностями на поверхности и неоднородностью на конце электрода.

### 3. Описание экспериментальной установки.

#### **Требования к экспериментальной установке**

К экспериментальной установке предъявлялись следующие общие требования:

- Кювета должна быть закрытой.
- Электроды должны легко заменяться.
- Кювета должна иметь прозрачную стенку для того, чтобы имела возможность производить видео- и фотосъемку электродов и межэлектродного промежутка.
- Должна быть обеспечена подача высокого однополярного напряжения на систему электродов.
- Должны производиться измерение и запись напряжения подаваемого на систему электродов с помощью АЦП.
- Должны производиться измерение и запись электрического тока проходящего через систему электродов с помощью АЦП.
- Должна быть обеспечена защита АЦП от возможных перенапряжений.

Индивидуальные дополнительные требования к экспериментальной установке:

- Установка должна обеспечивать возможность изменения давления в кювете, его контроль и поддержка в диапазоне  $0,1 \div 1$  атм.
- Необходимо иметь возможность подавать плавноменяющееся напряжение на систему электродов в автоматическом режиме.

- Необходимо обеспечить синхронизацию данных, регистрируемых с помощью АЦП, и видеоряда.
- Необходимо иметь возможность изменения и юстировки межэлектродного расстояния.
- Необходимо иметь возможность «оперативной» замены электрода типа «игла», на электрод типа «плоскость».

### **Измеряемые параметры и условия эксперимента**

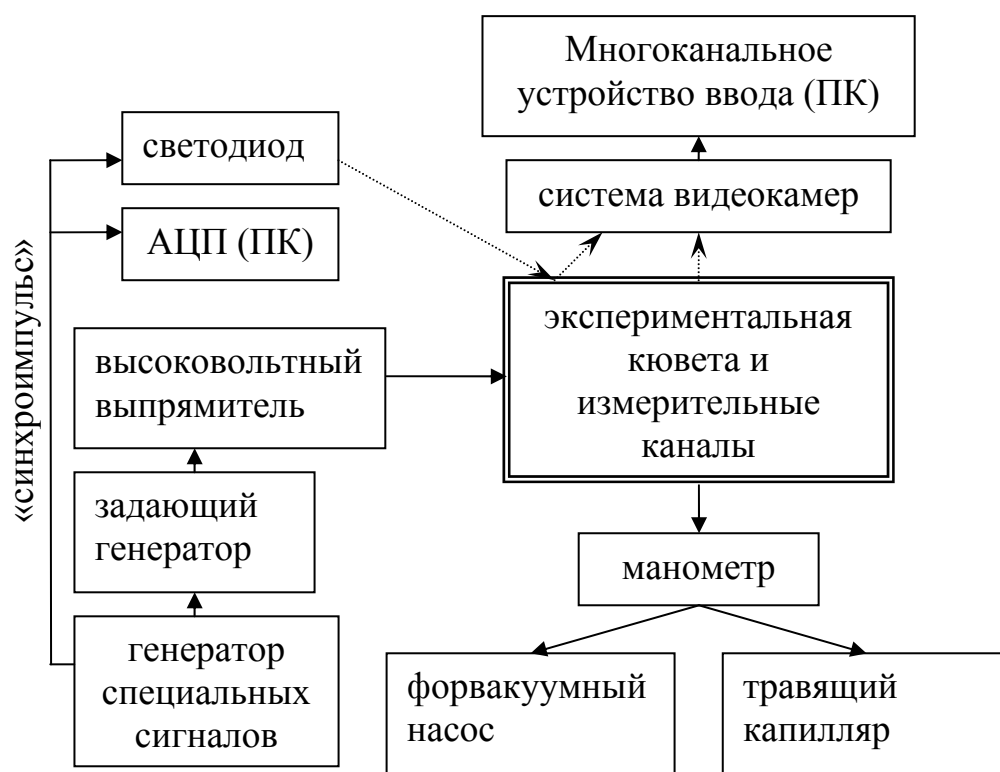
Измерения проводятся в квазистационарном режиме при очень медленно изменяющемся напряжении, насколько это позволяет внешняя цепь. Электрические параметры измеряются в течение 1÷2 секунд с частотой дискретизации АЦП до 40 кГц на канал. За время измерения делается стоп кадр свечения в межэлектродном промежутке.

В ходе исследований наблюдаемый разряд характеризуется следующими параметрами:

- Напряжение на межэлектродном промежутке.
- Электрический ток, проходящий через систему электродов.
- Форма свечения.

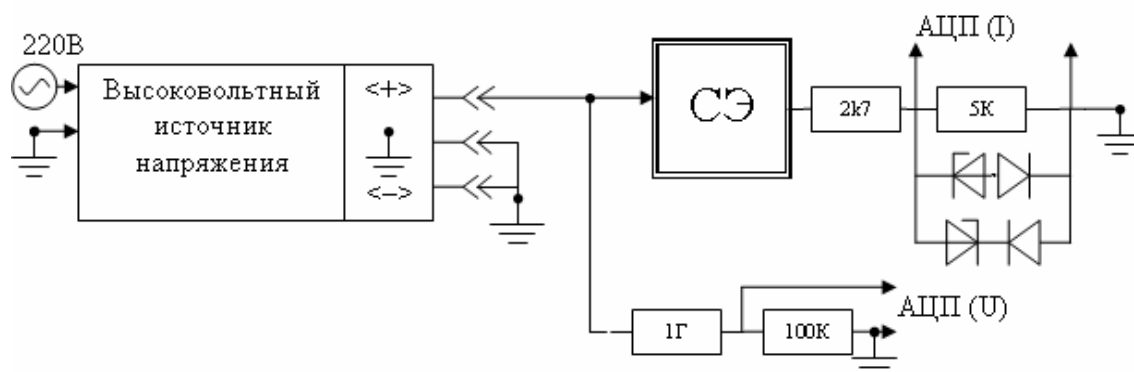
### **Схема экспериментальной установки**

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис.3.1.



**Рисунок 3.1.** Блок-схема экспериментальной установки.

На рис.3.2 представлена электрическая схема измерительных каналов с системой защиты входных каналов от высокого напряжения (безопасное напряжение, которое можно подать на АЦП составляет  $10 \div 25$  В, при наличии гальваноразвязки до 500 В).



**Рисунок 3.2.** Электрическая схема экспериментальной установки (подаётся положительное напряжение, отрицательное подаётся аналогично).

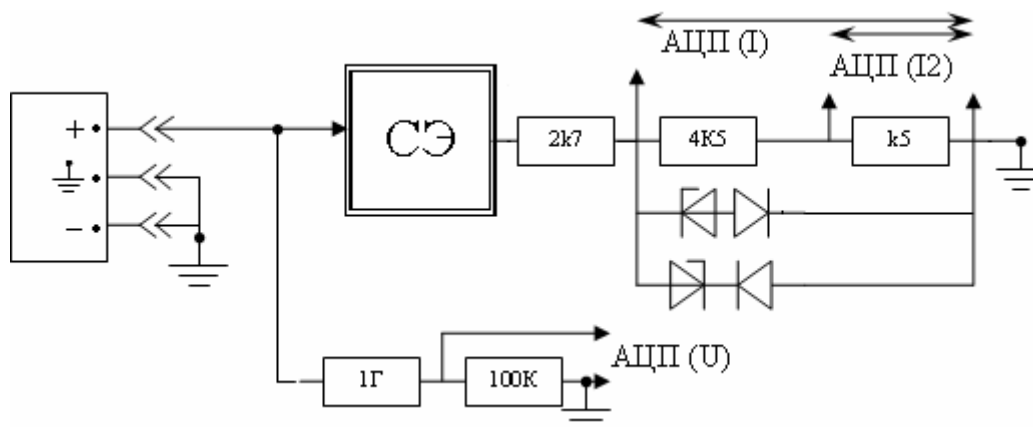
В схеме использовались стабилитронная защита входных каналов АЦП (использовались стабилитроны Д814А ПП), данная защита датчика тока ограничивает входное напряжение на входе АЦП на уровне 7 В. Сигнал, который позволяет регистрировать АЦП, от -5 до 5 В, т.е. можно считать сигнал неискажённым.

Отметим тот факт, что используемые стабилитроны рассчитаны на ток стабилизации 40мА, в то время как постоянная составляющая тока не превосходит 0,2 мА, т.е. стабилитрон способен его пропустить. Однако импульсы тока носят очень высокочастотный характер и «проходят» на измерительный канал АЦП.

Следует отметить, что была параллельно со стабилитронной защитой использовалась ферритная защита по всем измерительным каналам. Ферритная защита служит для следующих целей:

- Уменьшает и сглаживает высокочастотные импульсы,
- Защита от наводок, которые наводятся на сигнальные провода.

При проведении экспериментов наблюдались импульсы тока большой интенсивности, которые приходилось «обрезать» при оцифровке. Для устранения данного эффекта был создан альтернативный измеритель тока, обладающий двумя каналами, измеряющими ток (рис.3.3). Один из каналов обладал прежней чувствительностью (0,2 мВ/А), второй обладал на порядок меньшей чувствительностью (0,02 мВ/А) и позволял регистрировать полную амплитуду импульсов тока.



**Рисунок 3.3.** Электрическая схема экспериментальной установки (подаётся положительное напряжение, отрицательное подаётся аналогично), при альтернативном измерителе тока.

#### 4. Задание на предварительную подготовку

1. Рассчитать границу зоны ионизации около иглы, используемой в эксперименте при помощи программы *foto\_analys.m*.
2. Ознакомиться с программами обработки экспериментальных данных, используемыми в работе: *L-card-explorer 5*, *Matlab\_converter*, *laba\_9\_par*, *laba\_9\_run*, *2APDL.m*, *EVSCap*.
3. Ознакомиться с программами по обработке видеоизображений.

#### 5. Задания на проведение работы

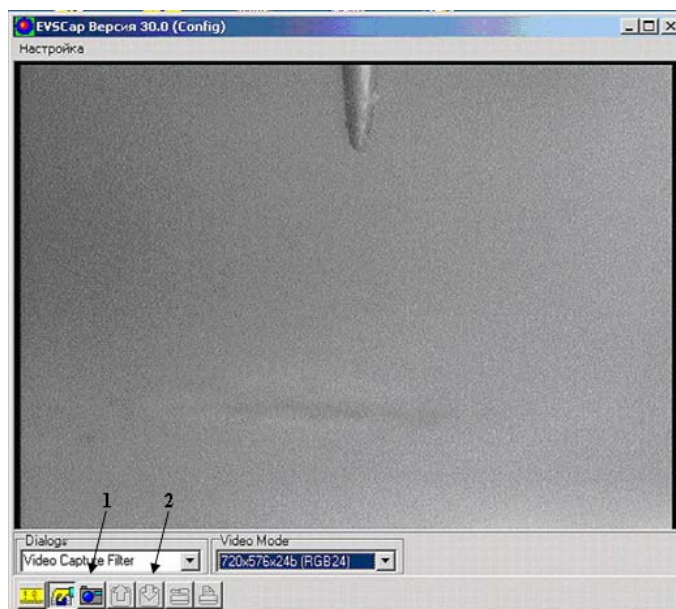
- Провести исследование коронного разряда в симметричной системе электродов игла-игла.
- Получить вольтамперные характеристики разряда в симметричной системе электродов игла-игла для разных расстояний между электродами.
- Определить напряжения зажигания самостоятельного разряда в данной системе электродов.
- Подробно описать наблюдаемые в эксперименте формы коронного разряда для каждого условия проведения эксперимента, сравнить полученные результаты с формами чехла короны в несимметричной системе электродов.

#### 6. Порядок проведения эксперимента

При проведении лабораторной работы эксперимент удобно проводить вручную, т.е. вручную изменять напряжение, подаваемое на систему электродов. Но обработку полученных результатов удобно проводить автоматически, используя имеющуюся программу по обработке результатов эксперимента (Приложение 1). Для этого требуется придерживаться определённого формата записи данных.

Эксперимент удобно проводить в следующем порядке:

1. Подготовка к измерениям:
  - 1.1. Включить и прогреть контрольно-измерительные приборы и компьютер.
  - 1.2. Загрузить требуемое программное обеспечение и выставить нужные настройки:
    - 1.2.1. Запустить программу записи для записи отдельных кадров *EVSCap* (ЗАО «ЭВС», СПб).
    - 1.2.2. Запустить программу *L-comp* (*L-card*, Москва) для записи осциллограмм или программу *L-card-explorer 5*, и подготовить её для записи. Оптимальные настройки: частота дискретизации 10 кГц на канал, время записи 2 сек.
  - 1.3. Включить измерительное оборудование:
    - 1.3.1. Включить монитор видеокамеры,
    - 1.3.2. Включить питание видеокамеры.
2. Произвести измерения, которые не требуют использования высокого напряжения:
  - 2.1. Сфотографировать систему электродов используя программу *EVSCap* (ЗАО «ЭВС», СПб) (рис.6.1). Для этого нажать кнопку (1) чтобы получить стоп-кадр, и потом нажать кнопку (2), чтобы сохранить этот стоп-кадр в нужную директорию.



**Рисунок 6.1.** Рабочее окно программы *EVSCap* (ЗАО «ЭВС», СПб)

- 2.2. Поместить рядом с электродами эталон длины, например, измерительную линейку.
- 2.3. Сфотографировать эту линейку.
- 2.4. Определить по фотографиям межэлектродное расстояние.

- 2.5. Выставить с помощью микровинта требуемое межэлектродное расстояние (уточнить у преподавателя).
- 2.6. Сфотографировать систему электродов, сохранить изображение в файле 1000.bmp в рабочем каталоге.
3. Включить источник высокого напряжения.
4. Провести эксперимент:
  - 4.1. Подать напряжение, примерное значение напряжения отображается на лицевой панели высоковольтного источника. Максимальную величину подаваемого напряжения необходимо уточнить у преподавателя.
  - 4.2. Включить запись осциллограммы,
  - 4.3. Сделать стоп кадр наблюдаемого процесса,
  - 4.4. Сохранить стоп-кадр в файле с именем №.bmp, в рабочем каталоге. Нумерацию вести в диапазоне от 1001 до 1999.
  - 4.5. Сохранить осциллограмму в файл №.dat. Нумерация должна соответствовать нумерации фотографий.
5. Завершить работу, выключая оборудование в обратном порядке.
6. Конвертировать осциллограммы в формат \*.mat с сохранением нумерации. Конвертацию файлов удобно производить используя программу *Matlab\_converter*. Для этого достаточно выделить все нужные файлы формата \*.dat и нажать правую кнопку «мышки». На экране появится всплывающее меню, в котором необходимо выбрать строчку «Конвертировать в mat-файл». При этом имена файлов останутся такими же и файлы с расширением .mat появятся в той же директории, где находились исходные файлы.

## 7. Обработка экспериментальных данных

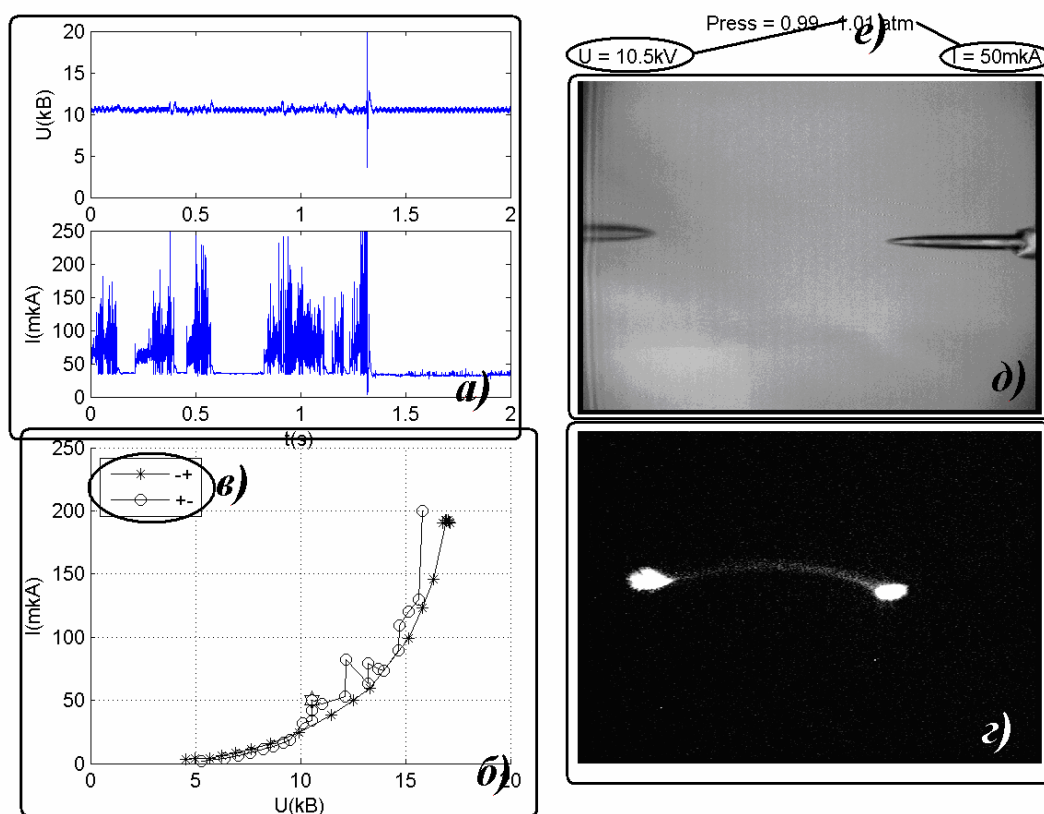
Обработка экспериментальных данных проводится в среде *MatLab*, с помощью специальных программ (см. Приложение), написанных студентами направления «ПМФ» физического факультета СПбГУ.

### Измерения при постоянном напряжении

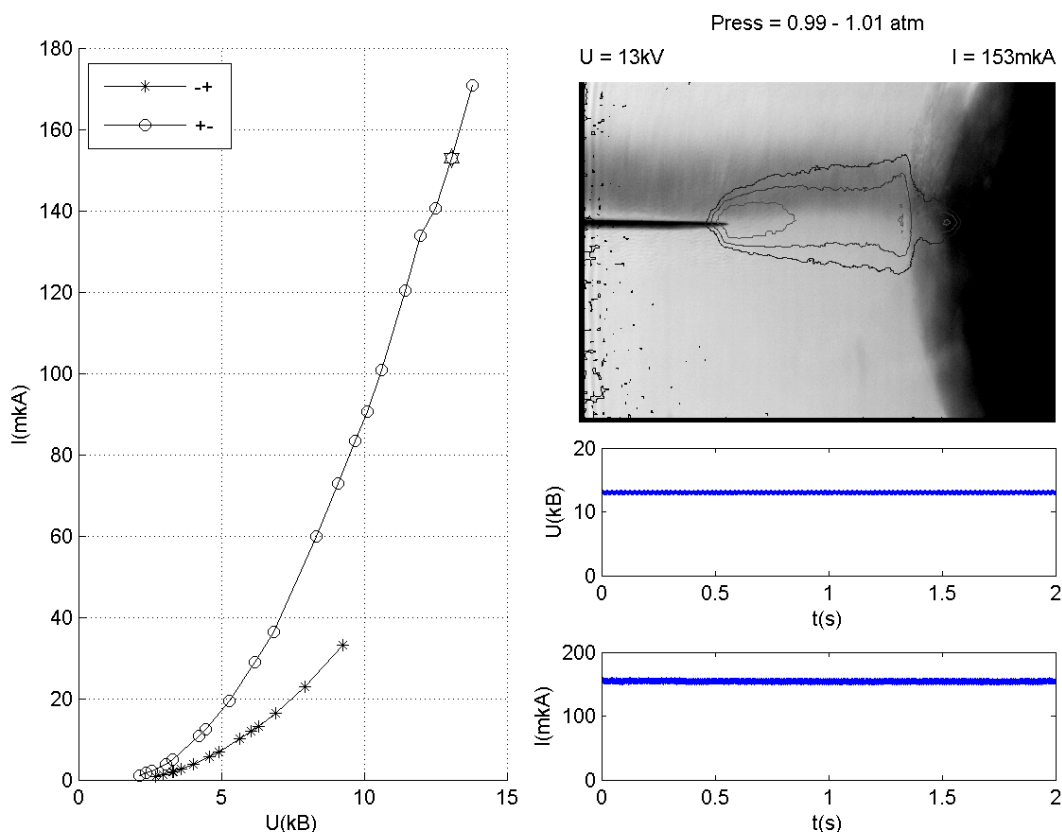
Для измерений при постоянном напряжении была написана специальная программа, состоящая из двух частей: *laba\_9\_par.m* и *laba\_9\_run.m* (Приложение 1), которая автоматически строит набор бланков данных эксперимента, каждый из которых содержит (рис.7.1):

- Вольтамперные характеристики нескольких серий измерений:
- Комментарии к каждой серии с указанием полярности прикладываемого напряжения и прочих атрибутов.
- На каждом бланке выделяется одна из точек вольтамперной характеристики, для которой производятся:
  - Подпись среднего значения тока и напряжения
  - Построение вольтсекундных и амперсекундных характеристик.

- Фотография свечения коронного разряда (один из вариантов):
  - Позитив кадра и фотография освещённой системы электродов, или
  - Негатив и фотография освещённой системы электродов (рис.7.1), или
  - Контурный график уровней светимости на фоне фотографии освещённой системы электродов (рис.7.2).



**Рисунок 7.1.** Пример стандартного представления экспериментальных данных. а) различные осциллограммы, б) вольтамперная характеристика для серий измерений, с указанием конкретной точки в) подпись полярности электродов в серии или другие комментарии, г) фотография свечения разряда, д) фотография электродов при освещении, без напряжения, е) средние значения тока и напряжения.



**Рисунок 7.2.** Пример стандартного представления экспериментальных данных при использовании визуализации линиями уровня свечения.

### Измерения в режиме изменяющегося напряжения

Эти измерения проводятся в автоматическом режиме, что требует значительно меньше времени для проведения экспериментов. Однако результаты экспериментов зависят от скорости изменения напряжения. Для уменьшения эффектов гистерезиса необходимо грамотно выбрать период модуляции напряжения, т.к. слишком медленная скорость изменения напряжения приводит к чрезмерному увеличению объёма записываемой информации, а также требует больших вычислительных мощностей для её дальнейшей обработки.

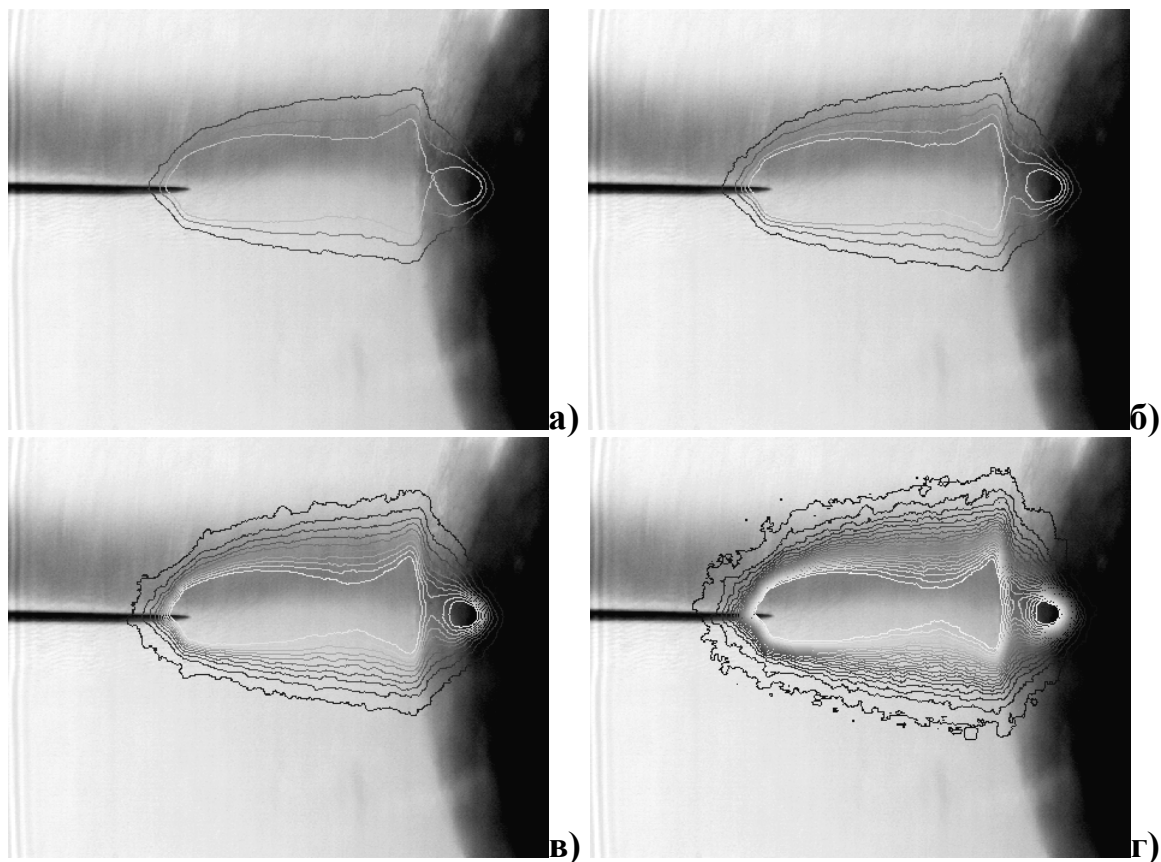
Для обработки полученных данных нужно указать только номера интересующих нас полукадров (кадров) видеозаписи. На выходе программы строится вольтамперная характеристика, на которой отмечены выбранные ранее точки, возле которых размещаются соответствующие кадры.

### Цифровая обработка изображений

При обработке видеок кадров чехла короны применяется построение линий уровня интенсивности свечения. В таком виде видеок кадры значительно более удобны для анализа. Эта обработка проводится при помощи специальной программ *laba\_9\_run.m* (Приложение 1). Количество



выводимых линий уровня (рис.7.3) можно легко изменить в программе *laba\_9\_par.m* (Приложение 1)



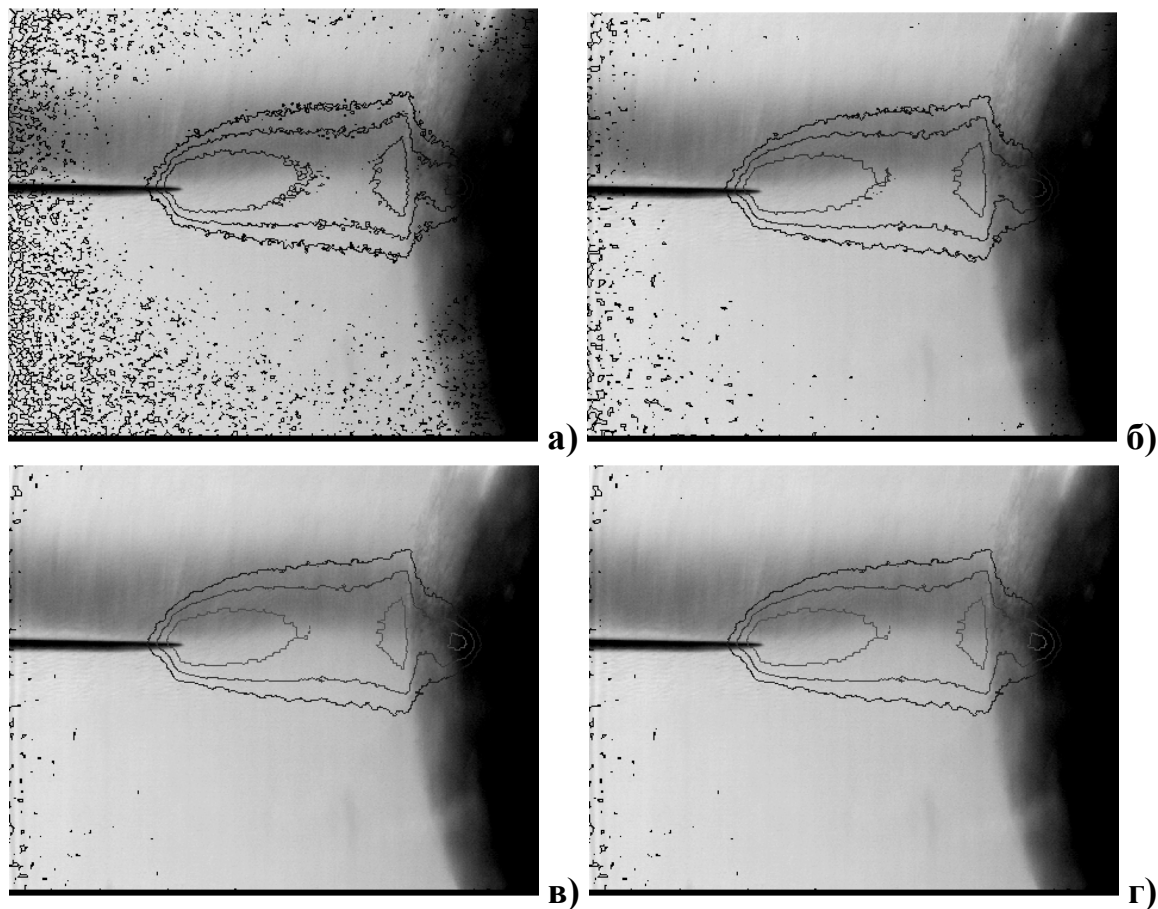
**Рисунок 7.3.** Фотография системы электродов с нанесёнными линиями уровня свечения. Напряжение 14 кВ, ток 170 мкА. Применялась билинейная фильтрация матрицей  $15 \times 15$ . Количество выводимых линий уровня интенсивности свечения а) 3, б) 5, в) 10, г) 20.

Построение линий уровня очень чувствительно к шумам. Негативный вклад шумов обуславливается следующими факторами:

- Шумы и дефекты отдельных пикселей светочувствительной матрицы.
- Флуктуации самого свечения.
- Фоновое излучение – недостаточная светозащита при проведении эксперимента.

Для борьбы с шумами хорошо работает метод билинейной фильтрации матрицы изображений. Как и любая обработка, билинейная фильтрация вносит свои искажения. Для различных изображений оптимален свой уровень (*интенсивность*) фильтрации, для этого в программе *laba\_9\_par.m* (Приложение 1) можно выбирать размер фильтрующей матрицы, т.е. степень (*интенсивность*) фильтрации. На рис.7.4 представлены картины линий уровня интенсивности свечения, при использовании матрицы фильтрации различного размера. Видно, что в

случаях (а) и (б) (рис.7.4) шумы значительны, случаи (в) и (г) наиболее оптимальны. Наиболее подходящий размер матрицы  $10 \times 10$ .



**Рисунок 7.4.** Фотография системы электродов с нанесёнными линиями уровня свечения. Напряжение 14 кВ, ток 170 мкА. Выводилось 3 линии уровня интенсивности свечения. Размер матриц фильтра а)  $5 \times 5$ , б)  $7 \times 7$ , в)  $9 \times 9$ , г)  $11 \times 11$ .

## Цифровая обработка осциллограмм

К сожалению, получаемые осциллограммы сильно зашумлены, поэтому для их цифровой обработки использовались два основных способа:

- фильтры Чебышева второго рода, которые являются встроенными функциями *MatLab*, что позволяет легко использовать их для фильтрации полученных сигналов;
- основная наводка содержала промышленную частоту (50 Гц), и её гармоники. От них можно избавиться, усредняя сигнал по временному отрезку 20 мкс (период промышленной частоты).

## Порядок обработки экспериментальных данных

Для обработки полученных экспериментальных данных, требуется:

1. Запустить программу *MatLab*
2. Поместить в рабочий каталог *MatLab*, который может не совпадать с рабочим каталогом, использованным при снятии экспериментальных данных, два *m*-файла: файл, указывающий параметры обработки *laba\_9\_par.m*, и файл, производящий обработку данных *laba\_9\_run.m*. Файлы можно получить у преподавателя.
3. В файле с параметрами *laba\_9\_par.m* указать параметры проведённого эксперимента и необходимые параметры обработки. Файл необходимо открывать в программе *MatLab*.
4. Запустить файл с параметрами на исполнение, для этого после завершения редактирования нажать клавишу *F5*.
5. Открыть и запустить на исполнение файл обработки *laba\_9\_run.m* (клавиша *F5*).
6. Извлечь из рабочей директории *MatLab* обработанные результаты – файлы в формате *\*.png*, и обработать в соответствии с полученным у преподавателя заданием.
7. Написать подробный отчёт.

## 8. Контрольные вопросы

1. Чем отличается коронный разряд при положительном напряжении от разряда при отрицательном напряжении?
2. Объяснить различия чехла коронного разряда от дальней зоны,
3. Какие существуют методы расчёта дальней зоны коронного разряда?

## 9. Литература:

1. F.W.Peek, JR. Dielectric phenomena in high-voltage engineering. // McGRAW-HILL book company. London. 1929.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда.: М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.. 1992. 536с.
3. Г.А. Остроумов. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей, М. Наука, 1979.
4. И.П. Верещагин. Коронный разряд в аппаратах электронно – ионной технологии. Энергоатомиздат. Москва. 1985г. Стр.11-20.
5. И.М. Бортник, И.П. Верещагин и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений. Энергоатомиздат. Москва. 1993г. Стр. 207 – 208.
6. Д.В. Сивухин, Общий курс физики. Электричество. М.: Наука, 1983.
7. Орешко А.Г., О структуре приэлектродных областей в коронном разряде. XXX Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Московская область, г. Звенигород, 24-28 февраля 2003. – М.: Московский авиационный институт. 2003.
8. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, под ред. академика

- В.Е. Фортова: М.: Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000
9. С.Б. Афанасьев, И.Н. Петрушенко, Ю.К. Стишков, Некоторые особенности коронного разряда и электрического ветра в воздухе, Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006г. Санкт-Петербург.
10. С.Б. Афанасьев, Ю.А. Зарядов, А.С. Воинов, М.А. Морозов, Ю.К. Стишков, Влияние барьерной изоляции на характер коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006г. Санкт-Петербург

## 10. Приложения

Используемые программы:

- *L-comp*
- *L-card-explorer 5*
- *EVSCap*
- *Matlab\_converter*
- *2APDL.m*
- *foto\_analys.m*
- *laba\_9\_par.m*
- *laba\_9\_run.m*

## **Лабораторная работа №4**

### **Влияние барьерной изоляции на газовый разряд**

Работа направлена на исследование одной из фундаментальных проблемы электрофизики газов – а именно исследование газового разряда, связанное с влиянием твердых диэлектрических вставок в межэлектродном пространстве на процессы ударной ионизации, происходящие в газовой среде.

#### **1. Цель работы**

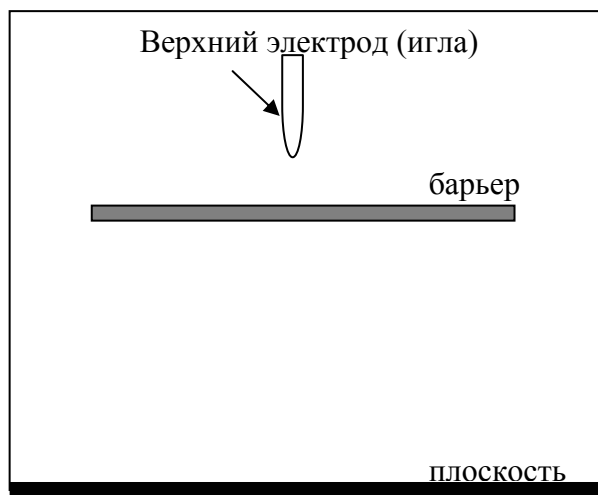
Провести экспериментальное исследование коронного разряда при наличии диэлектрической вставки (барьера) в межэлектродном промежутке. Получить зависимость форм коронного разряда от расстояния между активным электродом и барьером. Изучить влияние диэлектрической вставки на напряжение зажигания коронного разряда.

#### **2. Предварительные сведения**

Воздух до сих пор остается основным видом внешней изоляции линий электропередач, энергетического оборудования и высоковольтной техники. Традиционный путь создания изоляционных конструкций, включающий их полномасштабные натурные испытания еще на поисковом этапе работы, с увеличением номинальных напряжений становятся все менее перспективным. Техника испытаний становится трудоемкой и требует все больше временных и материальных затрат. В связи с этим возникает потребность в численных оценках электрических параметров воздушных промежутков на основе расчетных моделей, достоверно отражающих закономерности развития разряда в воздухе. Одним из таких параметров является напряжение зажигания коронного разряда, который доставляет не мало хлопот производителям. Для увеличения этого напряжения используется так называемая барьерная изоляция.

Наиболее простой формой барьерной изоляции является диэлектрическая вставка, внесенная в межэлектродный промежуток. На примере этой конфигурации в данной работе изучаются физические процессы, влияющие на ход разрядных процессов в газах и причины влияния формы этой вставки на напряжение зажигания разряда.

Коронный разряд достаточно хорошо изучен и очень удобен для изучения влияния барьерной изоляции на электрическую прочность газовых промежутков. Рассмотрим влияние диэлектрических вставок на примере коронного разряда от игольчатого электрода, размещенного над плоскостью (рис.2.1).



*Рисунок 2.1. Схема барьерной изоляции.*

Исходя из структуры коронного разряда, диэлектрическую вставку можно размещать внутри чехла короны, либо за его пределами. При размещении твердого диэлектрика во внешней области коронного разряда можно повлиять на процессы, происходящие в чехле коронного разряда, за счет осаждения на поверхности диэлектрика заряда, имеющегося во внешней области.

Чтобы уменьшить ток коронного разряда можно во внешней области коронного разряда поставить твердый диэлектрик, например, в середине межэлектродного промежутка. При этом диэлектрик поляризуется под действием поля. Кроме того, он, установленный диэлектрик, преграждает путь току ионов во внешней зоне короны и на нём осаждаются поверхностный заряд ионов, дрейфующих во внешней зоне. Поле, которое при этом создает поверхностный заряд на диэлектрике, противодействует полю электрода и тем самым препятствует образованию поверхностных электронов, инициирующих коронный разряд. Другими словами можно сказать, что поле перераспределяется и сосредотачивается в диэлектрике и приэлектродные процессы, образующие коронный разряд, прекращаются или уменьшаются.

Поскольку коронный разряд сопровождается электрическим ветром, то твердая вставка может повлиять также и на гидродинамику воздушных потоков.

Если размещать диэлектрическую вставку внутри предполагаемой границы чехла короны, то можно изменить траектории движения электронов, создающих лавины и таким образом повлиять на развитие лавинных процессов.

Кроме того, диэлектрическая вставка может ограничить приток затравочных электронов из окружающего пространства к коронирующему электроду и, следовательно, может повлиять на напряжение зажигания коронного разряда.

Наряду с этим можно повлиять и на процессы вторичной электронной эмиссии путем нанесения диэлектрических покрытий непосредственно на поверхность коронирующего электрода.

Таким образом, на разрядные процессы может повлиять не только наличие диэлектрика в межэлектродном промежутке или на поверхности электрода, но и его форма, а также свойства диэлектрика и свойства границы раздела: диэлектрик – газ.

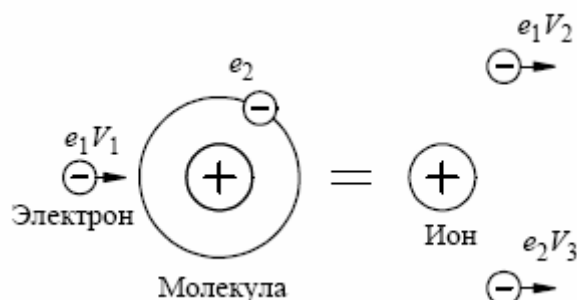
Газы в нормальном состоянии, в том числе и пары металлов, состоят из электрически нейтральных атомов и молекул и по этой причине не проводят электричества. Проводниками электричества могут быть только ионизованные газы. Помимо нейтральных молекул и атомов в ионизованных газах содержатся электроны, положительные и отрицательные ионы. Ионы в газах могут возникать под действием высоких температур, рентгеновских и ультрафиолетовых лучей, лучей радиоактивных элементов, космических лучей, в результате столкновений атомов газа с электронами и другими быстрыми элементарными и атомными частицами и т.д. Во всех этих случаях происходит ионизация молекул газа, т.е. вырывание из электронной оболочки атома или молекулы одного или нескольких электронов. Он приводит к освобождению электронов и образованию положительных ионов. Освободившиеся электроны могут присоединяться к нейтральным молекулам и атомам, превращая их в отрицательные ионы. Ионы и свободные электроны делают газ проводником электричества. Впрочем, и в нормальных условиях в газах, газы обладают электрической проводимостью, например в воздухе, из-за действия космического излучения, в одном кубическом метре присутствует приблизительно  $10^6$  электронов и ионов.

В отсутствие внешнего электрического поля частицы газа находятся в состоянии хаотического теплового движения, постоянно сталкиваясь с другими частицами. Наличие внешнего электрического поля приводит к возникновению направленного движения заряженных частиц, т.е. к появлению в газе электрического тока. Подвижность частицы в электрическом поле зависит от ее размеров: чем больше размеры частицы, тем меньше ее подвижность. При движении заряженные частицы, разгоняясь в электрическом поле, сталкиваются с нейтральными частицами и передают им часть энергии, что может привести просто к увеличению их кинетических энергий, либо к возбуждению – переход электрона на более высокую орбиту, либо к ионизации. Возбужденная молекула стремится вернуться в нормальное состояние, состояние с минимальным энергетическим уровнем, при этом излучается фотон, уносящий избыток энергии (среднее время жизни возбужденного атома  $\sim 10^{-10}$  с). Одновременно с ионизацией атомов и молекул газа происходит процесс взаимной нейтрализации заряженных частиц – рекомбинация.

Вследствие действия двух противоположных факторов – ионизации и рекомбинации – устанавливается равновесное состояние, при котором в единицу времени возникает и рекомбинирует определенное количество заряженных частиц. Различают объемную и поверхностную ионизации. Объемная ионизация – это образование заряженных частиц в объеме газа между электродами. Поверхностная ионизация – это эмиссия заряженных частиц с поверхности электродов.

К объемной ионизации относится ударная и фотоионизация:

Ударная ионизация – процесс ионизации нейтральных молекул или атомов, путем соударения заряженной частицы с нейтральным атомом или молекулой, в процессе которого появляется один или несколько новых электронов и ион (рис.2.2). Т.е., если к промежутку между электродами в газе приложено напряжение, то заряженные частицы под действием электрического поля кроме тепловой скорости приобретают направленную скорость  $V = k \cdot E$ , где:  $V$  – скорость [см/с];  $k$  – коэффициент пропорциональности, получивший название "подвижность". Так, например, подвижность электронов равна  $k_{эл} \approx 400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , для ионов  $k_{ион} \approx 2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $E$  – напряженность внешнего электрического поля [В/см].



**Рисунок 2.2.** Ударная ионизация электроном нейтрального атома

При этом кинетическая энергия частиц может стать существенно больше тепловой и достаточной для осуществления ударной ионизации нейтральных частиц.

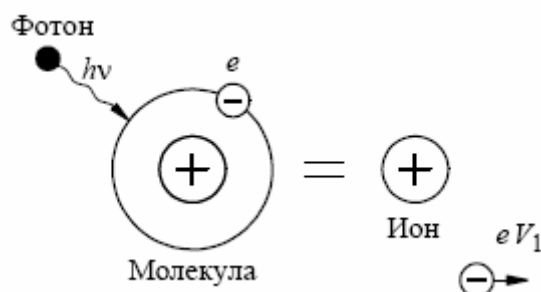
Условие ионизации может быть записано в виде:

$$\frac{mV^2}{2} > W_0,$$

где  $m$  – эффективная масса заряженной частицы [кг] ( $m_{эл} = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – эффективная масса электрона;  $m_{ион} = 1,7 \cdot 10^{-28}$  кг – эффективная масса протона),  $W_u$  – энергия ионизации нейтрального атома или молекулы [эВ]. Видно, что из-за существенной разницы в подвижностях основную роль в ударной ионизации играют электроны.



Фотоионизация – процесс ионизации нейтральных молекул или атомов, путем поглощения ими фотонов, вследствие чего появляются один или несколько электронов и ион (рис.2.3). Она служит источником затравочных электронов, от которых начинаются электронные лавины, в частности при распространении стримера.



**Рисунок 2.3.** Фотоионизация нейтрального атома

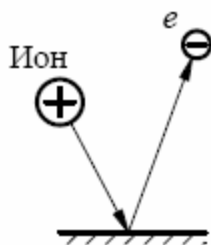
Энергия фотона, излучаемого возбужденными атомами или молекулами, должна быть больше энергии ионизации при поглощении фотона нейтральным атомом или молекулой. При фотоионизации возможна и ступенчатая ионизация, т.е. поглощение нескольких фотонов с энергией ниже энергии ионизации.

Поверхностная ионизация – это процесс, при котором происходит эмиссия электронов с поверхности электродов. Он может осуществляться несколькими путями:

- 1) бомбардировкой поверхности катода положительными ионами – вторичная ионо-электронная эмиссия (рис.2.4). Условие для выхода

$$\text{электрона с поверхности: } \frac{m_{\text{ион}} \cdot V_{\text{ион}}^2}{2} \geq W_{\text{вых}},$$

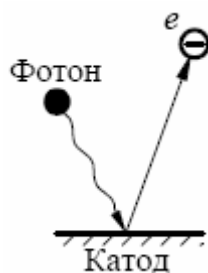
где  $m_{\text{ион}}$ ,  $V_{\text{ион}}$  – масса и скорость иона, соответственно,  $W_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона из металла.



**Рисунок 2.4.** Бомбардировка поверхности ионом

- 2) лучистой энергией, облучающей катод – ультрафиолетовый свет, рентген, излучения возбужденных атомов и молекул в объеме газа между электродами (рис.2.5). Последнее легко представить для смеси

газов, например для воздуха, в котором энергия ионизации кислорода  $W_u^{O_2} = 12,2$  эВ, меньше чем азота  $W_u^{N_2} = 15,58$  эВ.



**Рисунок 2.5.** Облучение катода.

Для реализации поверхностной ионизации необходимо, чтобы энергия воздействия была больше энергии выхода электрона из катода  $W_{вых}$ . Энергия  $W_{вых}$  ниже энергии объемной ионизации газа примерно в 2 раза и более, и очень сильно зависит от материала электрода. Для медных и стальных электродов в воздухе работа выхода составляет  $W_{вых} = 4,5$  эВ.

### **Механизмы влияния барьерной изоляции на ионизационные процессы в газах.**

Основную часть пространства между электродами при униполярном коронном разряде занимает внешняя область, в которой движутся ионы только одного знака. Чехол коронного разряда, в котором сосредоточены ионизационные процессы, играет роль поставщика ионов для внешней зоны (зоны дрейфа). Система уравнений поля для внешней зоны коронного разряда в установившемся режиме имеет следующий вид:

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (2.1)$$

$$E = -\operatorname{grad} \varphi, \quad (2.2)$$

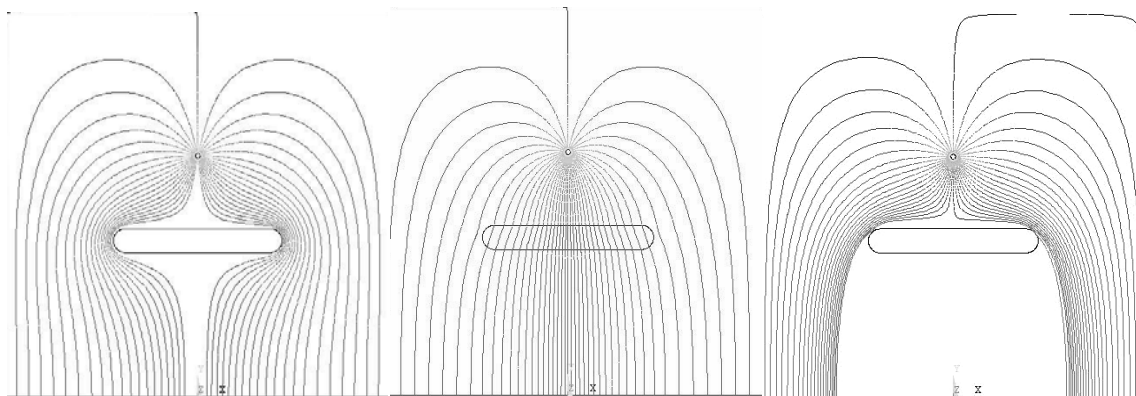
$$\operatorname{div} J = 0, \quad (2.3)$$

$$J = \rho b E. \quad (2.4)$$

Первое уравнение – уравнение Пуассона – представляет собой запись теоремы Гаусса в дифференциальной форме и устанавливает связь между плотностью объемного заряда  $\rho$  и напряженностью поля  $E$ . Второе уравнение – известное выражение напряженности поля через потенциал  $\varphi$ . Далее следует уравнение неразрывности плотности тока, и, наконец, четвертое уравнение отражает связь плотности тока  $J$  с плотностью объемного заряда  $\rho$ , напряженностью  $E$  и подвижностью ионов  $b$ .

Рассмотрим влияние диэлектрической пластины, расположенной вдали от игольчатого электрода, на процессы ионизации в начальной

стадии коронного разряда. Поместим в середине межэлектродного промежутка пластину из твердого диэлектрика с закругленными краями. В области напряжений соответствующих несамостоятельной проводимости воздуха, до порога возникновения коронного разряда, для расчета электрического поля можно использовать электростатическое приближение (рис.2.6, слева).



**Рисунок 2.6. Электрическое поле.**

Начиная с порога возникновения коронного разряда, электрическая проводимость воздуха резко повышается, а проводимость пластины остается неизменной. Поэтому электростатическое приближение оказывается непригодным для расчета электрического поля в такой системе. Если предположить, что средняя проводимость воздуха остается однородной, но повышенной, например, до значения  $10^{-8}$  Сим·м и рассчитать задачу прохождения тока в такой системе, то распределение силовых линий электрического поля будет соответствовать правой картине (рис.2.6, справа). Видно, что силовые линии поля, а равным образом и тока обтекают область малой проводимости, но поле в нее не проникает. Реальная ситуация описывается путем решения системы из двух уравнений (2.1) и (2.3), при этом распределение электрической проводимости газа будет неоднородно и на поверхности твердого изолятора осядет электрический заряд.

Для получения непротиворечивой картины необходимо совместно решить уравнения неразрывности и уравнение Пуассона. Фактически моделирование данной задачи сводится к численному решению системы уравнений электростатики: уравнения Пуассона и уравнения неразрывности тока.

В результате получается сложная нелинейная задача. Одним из методов решения данной задачи является метод итерационных приближений. Суть итерационного метода сводится к последовательному уточнению решения по шагам. Уточнение происходит автоматически до тех пор, пока задача не сойдется до определённой величины погрешности.

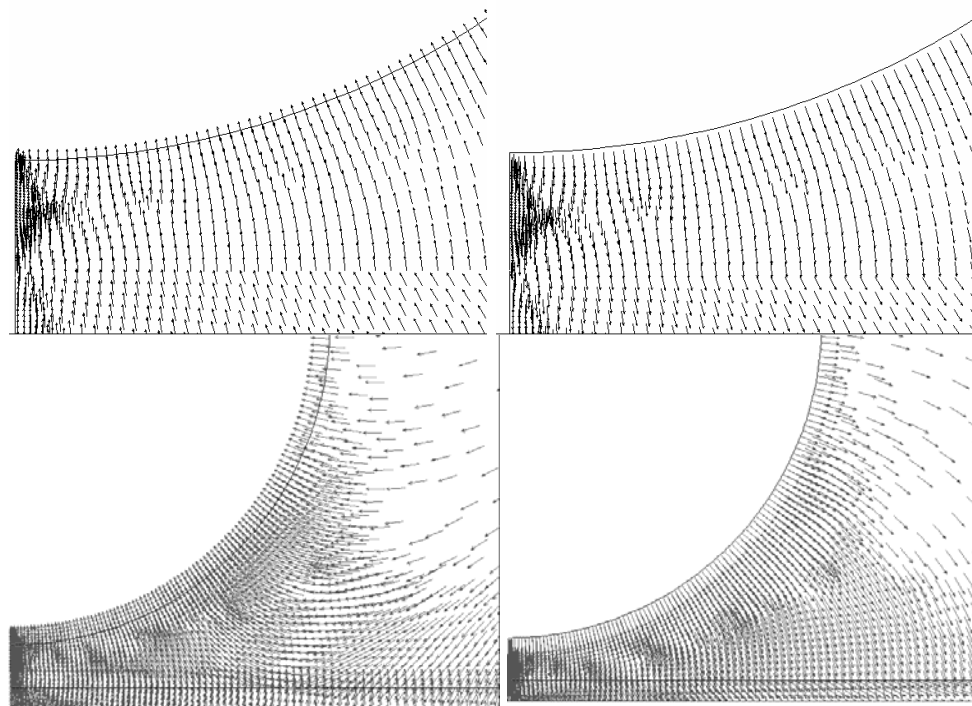
## Расчет поверхностного заряда на диэлектрике

Попытки моделирования картины силовых линий путем осаждения на поверхности изолятора поверхностного заряда дают картину несколько отличную от представленной на среднем рисунке (рис.2.6, середина), в этом случае поле обтекает твердый изолятор несколько иначе.

Для получения непротиворечивой картины необходимо совместно решить уравнения неразрывности и уравнение Пуассона. Одним из методов решения данной задачи является метод итерационных приближений. Суть итерационного метода сводится к последовательному уточнению решения по шагам. Уточнение происходит автоматически до тех пор, пока задача не сойдется до определённой величины погрешности.

Для численного моделирования задачи применялся пакет численного моделирования *ANSYS*, версий 8.1 и выше, в силу особенностей программы. Для расчета были написаны программы *trec1-trec3* (см. Приложение). При написании скриптов учитывалась логика решения задачи, в результате чего была введена модульность, что позволит легко модернизировать и наращивать алгоритм, а также использовать уже работающие модули для решения других задач.

Однородно заряженная плоскость создает вблизи себя однородное электрическое поле. Если заряд мал, оно будет гораздо меньше поля в любой точке области между иглой и барьером, которая нас и интересует (рис.2.7, слева).

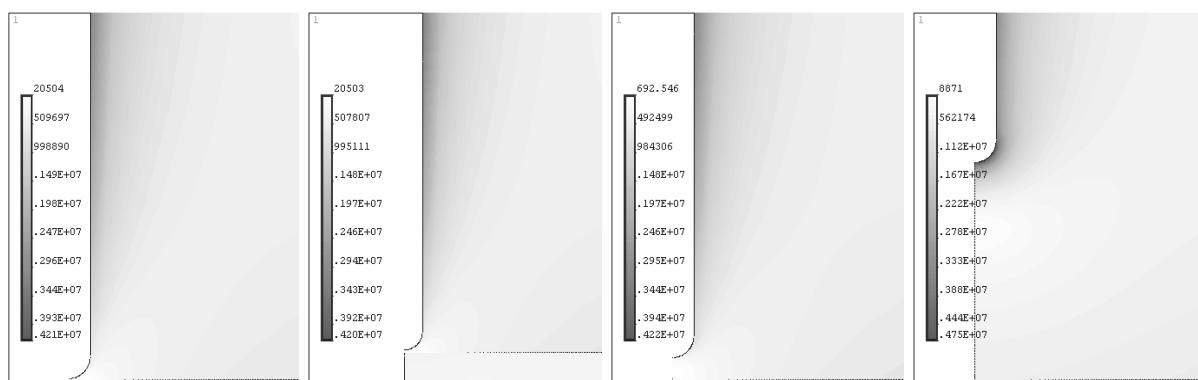


**Рисунок 2.7.** Векторная диаграмма напряженности поля у головки иглы,  $\sigma = 1 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup> (слева) и  $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup> (справа).

При возрастании плотности заряда эффект растет, поле поверхностного заряда начинает существенно влиять на приэлектродную зону (рис.2.7, справа). При величине поверхностного заряда выше критической поле между барьером и иглой может изменить направление. При этом поле оказывается перевернутым у нижней поверхности электрода, что, должно препятствовать электронам уходить с катода, т.е. полностью остановить процессы ионизации (рис.2.7).

Так изменяется характер поля при возрастании плотности заряда. Последний случай нереален, т.к. для его реализации необходим дополнительный источник энергии. Поэтому рассмотрим вариант, когда заряд влияет на поле, но еще не блокирует эмиссию электронов с катода.

На рисунке (рис.2.8) представлены распределения напряженности поля у игольчатого электрода при различных расстояниях (10, 40, 300, 3000 мкм) до диэлектрической вставки с поверхностным зарядом  $\sigma = 1 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>.



**Рисунок 2.8.** Распределения напряжённости электрического поля у игольчатого электрода для расстояний 10, 40, 300, 3000 мкм, соответственно.

По распределениям напряженности (рис.2.8) максимум напряженности без заряда составлял 71 мВ/м и был сосредоточен в нижней части головки игольчатого электрода. Под влиянием поверхностного заряда распределение поля по поверхности электрода заметно изменилось. Максимум напряженности существенно снизился и сместился вверх по боковой поверхности электрода, и лишь при больших расстояниях, более 1000 мкм, максимум находится по прежнему у головки иглы, но существенно снижен и составляет всего 4,7 мВ/м. При этом под головкой игольчатого электрода до поверхности диэлектрической вставки образуется область пониженной напряженности электрического поля. Также изменяется ход силовых линий поля, под электродом появляется область, в которой поле изменяет направление, отражаясь от поверхности барьера под острым углом. Эта область хорошо видна на векторном

графике (рис.2.7) Причем на графиках видно, что значения напряженности электрического поля под игольчатым электродом в области малых расстояний, менее 100 мкм, становятся существенно меньше критических значений – 24,5 кВ/см (0,24 мВ/м).

Встроенная функция, выводящая траекторию заряженной частицы в *ANSYS*, численно решает уравнение движения в электромагнитном поле без сопротивления окружающей среды:

$$m\vec{a} = q(\vec{E} + [\vec{V} \times \vec{B}])$$

Такой подход неприменим к газовой среде при атмосферном давлении – в газе электрон испытывает столкновения, причем при атмосферном давлении длина свободного пробега электрона меньше 1 мкм. Если расстояние от иглы до барьера больше этого значения, то электрон испытает сотни столкновений при своем движении по траектории. Если расстояние достаточно большое, он может кардинально изменить направление своего движения.

Если столкновений много, а масса атомов гораздо больше массы электрона, можно учесть влияние столкновений следующим образом – найти среднюю скорость частицы, считая, что ее хаотическая составляющая слабо влияет на траекторию движения электрона.

Усреднение уравнения движения с учетом столкновений дает [1]:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = q\vec{E} - m\nu\vec{V} \quad (2.5)$$

Таким образом, если столкновений много, их можно учесть как силу, аналогичную трению, здесь  $\nu$  – эффективная частота столкновений. Эффективная частота столкновений для воздуха при атмосферном давлении по данным составляет  $3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . При определенных условиях ее можно считать не зависящей от скорости движения электрона.

Уравнение (2.5), однако, неудобно для программной реализации – слишком высока «сила трения», поэтому приходится брать очень малый шаг интегрирования. Его длина много меньше длины, на которой существенно изменяется электрическое поле.

Но в области, где поле можно считать однородным, уравнение легко интегрируется, и решение его выглядит так:

$$\vec{V}(t) = \frac{q}{m\nu} \vec{E} \cdot (1 - \exp[-\nu t]) + \vec{V}(0) \cdot \exp[-\nu t] \quad (2.6)$$

Вид решения (2.6) показывает, что на расстояниях, равных нескольким упругим столкновениям, направление исходного движения теряется, и на фоне хаотического движения остается движение (дрейф электрона) вдоль силовых линий поля. Последнее выражение используется на маленьких отрезках траектории движения электрона, на которых электрическое поле можно считать однородным.

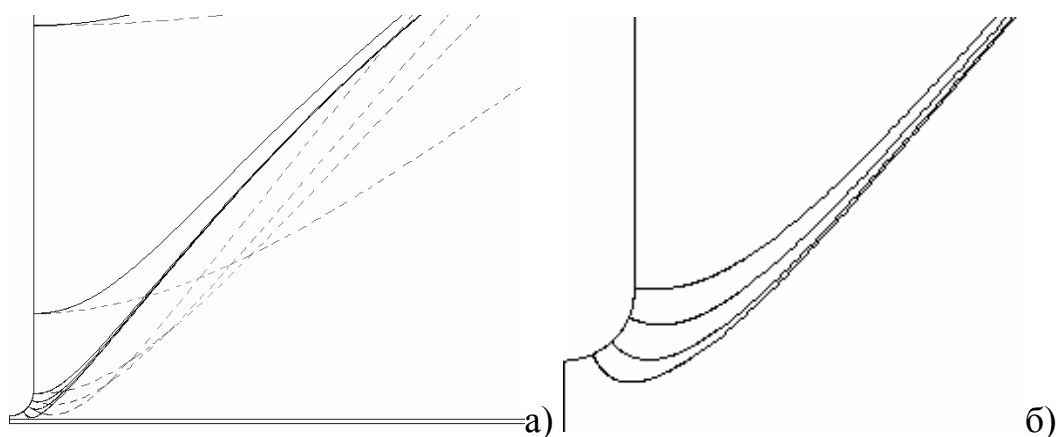
Алгоритм решения таков – выбирается малая длина  $L$  отрезка траектории электрона, на которой поле считается однородным. По формуле (2.6) вычисляется значение скорости на этом отрезке. На очередном шаге предыдущее значение скорости используется для получения очередной точки, куда попадет электрон. Затем подсчитывается среднее значение поля на последнем отрезке и подставляется в формулу (2.6.), по которой подсчитывается значение скорости в конце отрезка.

Затем по рассчитанным координатам точки строятся опорные точки *KeyPoints* (KP), а по ним линии – траектории движения электрона.

На основе изложенного алгоритма написана программа, реализующая предложенный метод.

В результате расчета получены траектории движения электронов в вакууме, построенные с использованием типовой функции, и при помощи разработанной программы – в воздухе при атмосферном давлении (рис.2.9).

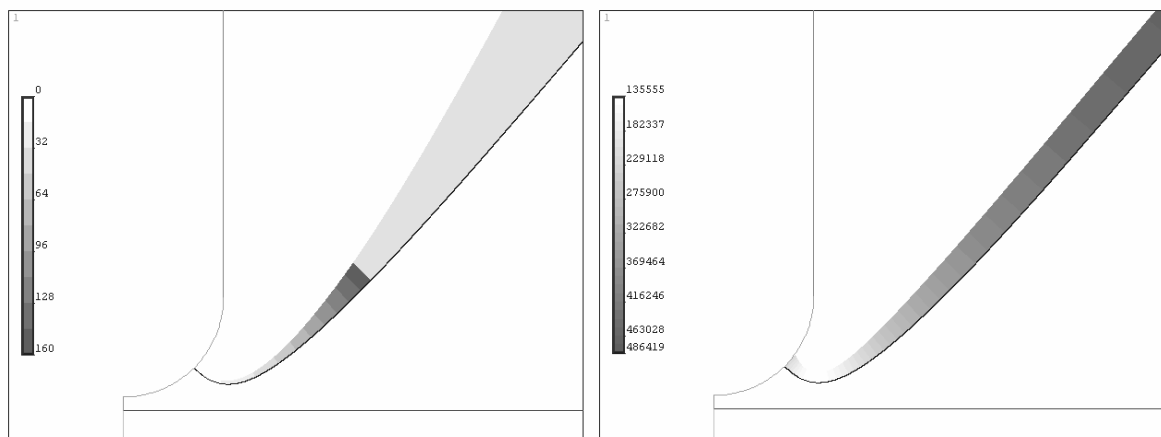
Прерывистые линии – траектории движения электронов в вакууме, сплошные – учитывающие столкновения. Видно, что они сильно отличаются от траекторий без столкновений и больше соответствуют ходу силовых линий электрического поля. На графиках хорошо видна зона отражения электронов от барьера, лежащая в области отражения поля (сравнить с линиями уровня напряженности поля). При движении после отражения от барьера электроны фокусируются, траектории в верхней части сближаются.



**Рисунок 2.9.** Траектории движения электронов в вакууме (пунктирные линии) и в воздухе (сплошные линии) (а) и траектории электронов в воздухе у барьера (б)

Таким образом объясняется отраженная форма короны, наблюдающаяся в экспериментах с отрицательной короной.

На рис.2.10 представлены графики распределения потенциала и напряженности электрического поля вдоль траектории движения электрона. График представлен в форме полосы переменной толщины построенной вдоль реальной траектории. Ширина полосы соответствует текущему значению отображаемой величины: потенциала или напряженности поля. Потенциал нанесен с градациями в 16 В, чтобы визуализировать потенциальные зоны ионизации вдоль траектории движения электрона. Видно, что зоны ионизации достаточно однородно распределены вдоль траектории, соседние участки изменения потенциала на 16 В имеют длину, различающуюся не более чем на 10÷15 %.



**Рисунок 2.10.** Распределение потенциала (слева) и распределение напряженности поля (справа) вдоль траектории движения электронов с учетом столкновений, расстояние до барьера 40 мкм.

Это хорошо видно из распределения энергии электрона вдоль траектории его движения. Зависимость близка к линейной, энергия в 16 эВ набирается на первом участке, длиной 110 мкм, второй – длиной 120 мкм, третий – 90 мкм. Сравнение с распределением зон ионизации без объемного заряда показывает, что длина ионизации возрастает на два порядка, что существенно снижает вероятность ионизации и делает процесс ионизации практически невозможным. Поэтому для возникновения короны, при прочих равных условиях, необходимо более высокое напряжение, что и наблюдается в эксперименте.

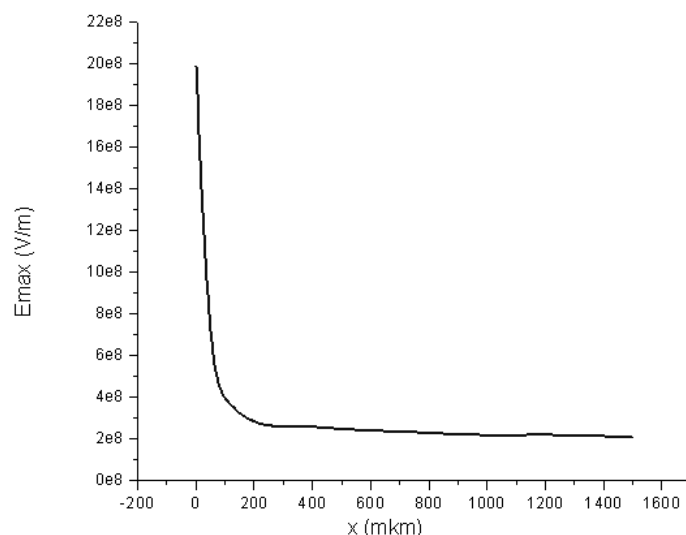
Наличием поверхностного заряда объясняется отраженная форма отрицательной короны, наблюдаемая в экспериментах.

### **Влияние величины расстояния от иглы до барьера**

Расстояние между электродом-«иглой» и плоскостью диэлектрика варьировалось от 0 до 1,5 мм с шагом 10 мкм, максимальная

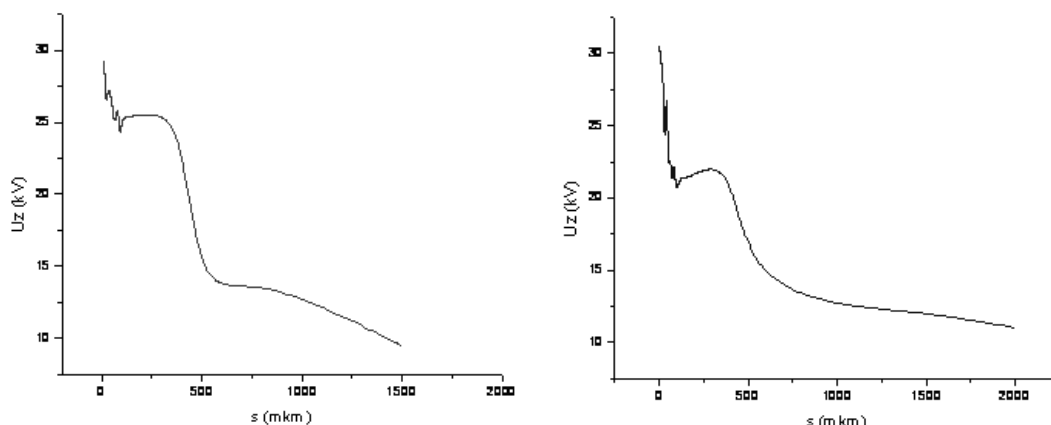


напряженность поля определялась с помощью программного комплекса *ANSYS*. При изменении расстояния от иглы до барьера ( $x$ ) изменялась и напряженность на конце иглы. Эта зависимость представлена на рисунке (рис.2.11). Локальная напряженность поля у иглы возрастает с уменьшением расстояния между иглой и барьером. Резкий рост напряженности происходит на расстояниях от 0 до 100 мкм.



**Рисунок 2.11.** Зависимость максимальной напряженности поля от расстояния между иглой и барьером.

На рисунке (рис.2.12) представлены обобщенные зависимости напряжения зажигания коронного разряда от расстояния до барьера при фиксированном межэлектродном расстоянии. Видно, что зависимости напряжения зажигания короны положительной и отрицательной полярностей близки по форме.

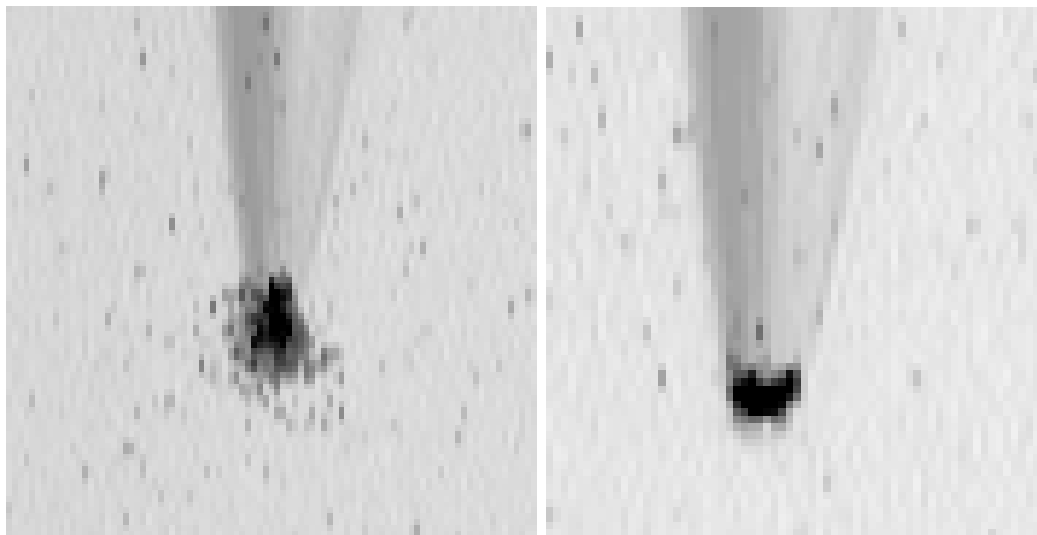


**Рисунок 2.12.** Зависимость напряжения зажигания коронного разряда положительной (слева) и отрицательной (справа) полярностей от расстояния между активным электродом—«иглой» и барьером. Расстояние между электродами 7.85 мм.

При перемещении барьера от положения соприкосновения с электродом–«иглой» до расстояния 2 мм напряжение зажигания короны существенно изменяется, почти в 2,5 раза. Напомним, что напряжение зажигания униполярного коронного разряда для того же межэлектродного расстояния без барьера составляет 4–5 кВ, для обеих полярностей. Таким образом, введение барьера в дальней зоне увеличивает напряжение зажигания коронного разряда в 2÷3 раза.

Видно (рис.2.12), что ход кривых на уровне расстояний 500 мкм для обеих полярностей имеет резкий спад напряжения зажигания до значений в 10÷12 кВ. При дальнейшем увеличении расстояния спад зависимости становится более плавным. В диапазоне расстояний от «иглы» до барьера 50÷300 мкм напряжение зажигания практически постоянно. При малых расстояниях от 0 до 50 мкм зависимость немонотонная. Таким образом, имеются три зоны влияния барьера на напряжение возникновения коронного разряда: сверхближняя 0÷50 мкм, ближняя (50÷500 мкм) и дальняя (больше 500 мкм).

При отрицательном напряжении на электроде начальная структура чехла коронного разряда имеет конусообразный вид с диффузной внешней границей, вершина конуса совпадает с кончиком иглы. При положительном напряжении корона имеет облегающую шапкообразную форму (рис.2.13).



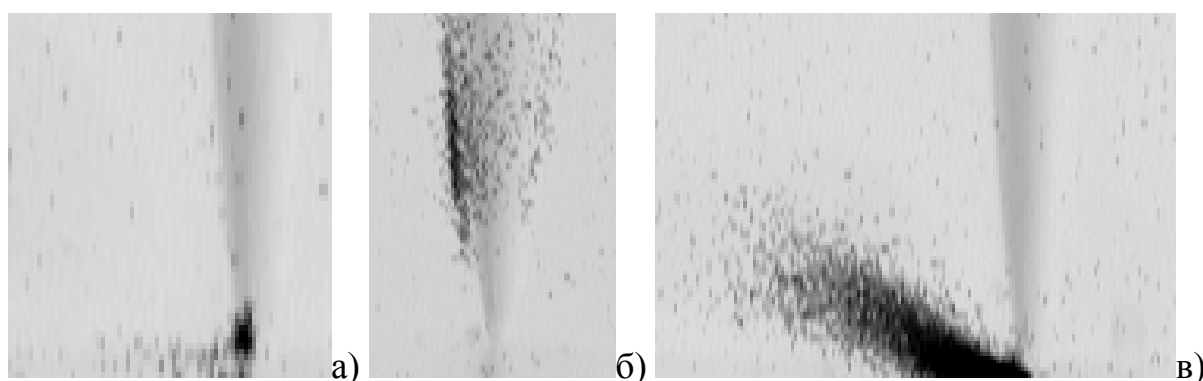
**Рисунок 2.13.** Форма коронного разряда при отрицательном (слева) и положительном (справа) напряжении на электроде–«игле».

Судя по фотографиям светлой зоны короны (рис.2.13), ближняя зона соответствует чехлу короны, дальняя – темной области разряда, а размеры сверх ближней зоны короны близки к размерам отдельных лавин.

Если барьер расположить на малых расстояниях от кончика иглы, соизмеримых с размерами лавины, при атмосферном давлении средний

размер лавин составляет 10 мкм, то структура чехла существенно изменяется. Во-первых, появляются структуры, распространяющиеся вдоль поверхности барьера. Во-вторых, наблюдаются новые формы коронных процессов: поверхностный, боковой, отраженный (рис.2.14). В первом и втором случаях, возникающих преимущественно при положительном электроде, лавины и стримеры распространяются из объема на кончик иглы параллельно поверхности изолятора. Во втором случае лавинные процессы перемещаются с кончика иглы на ее боковую поверхность и имеют очаговый мелкозернистый характер (рис.2.14, б).

В случае отрицательной иглы лавинно-стримерные процессы, распространяющиеся от поверхности электрода, отражаются от поверхности изолятора (рис.2.14, в).

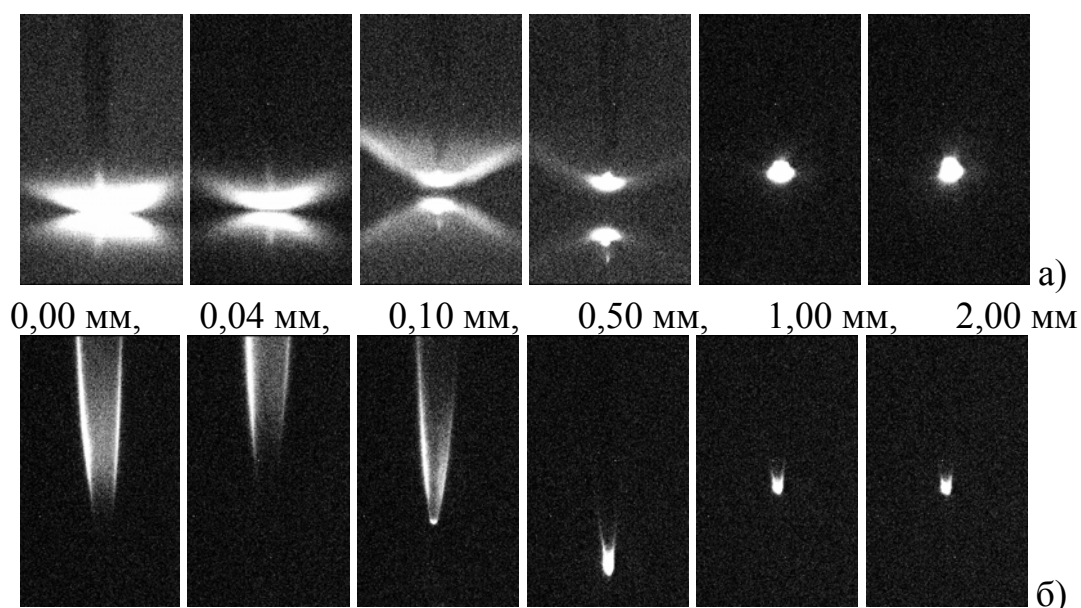


**Рисунок 2.14.** Новые формы коронных процессов, наблюдаемые при установке барьера в ближней зоне коронного разряда: а – поверхностный, б – боковой, в – отражённый.

Для сравнительного анализа различных форм чехла коронного разряда, при разных расстояниях от электрода-«иглы» до барьера, они представлены на одном рисунке (рис.2.15): отрицательная полярность сверху, положительная – снизу. Представленные кадры не обрезаны по кромке диэлектрика, как это сделано выше (рис.2.14), поэтому в нижней части наблюдается отражение чехла короны от поверхности плексигласа.

На представленных кадрах достаточно четко прослеживается отраженная форма чехла короны (рис.2.15, а), видно ее вырождение при расстоянии 0,5 мм и переход в традиционную форму коронного разряда при расстояниях 1÷2 мм. При этом не наблюдается ни пикообразной формы, ни диффузного свечения всего межэлектродного промежутка, возникающих у электрода-«иглы» без барьера. Края чехла коронного разряда достаточно четкие, форма чехла конически расширена книзу.

Это можно объяснить наличием твердой преграды, перекрывающей путь потоку электрического ветра, который выносит ионизированный газ из чехла короны в межэлектродный промежуток.



**Рисунок 2.15.** Различные формы чехла коронного разряда отрицательной (сверху) и положительной (снизу) полярности, при разных расстояниях от электрода-иглы до барьера. Расстояние между электродами постоянно 7,85 мм.

Иная картина наблюдается при положительной полярности игольчатого электрода (рис.2.15, б). В этом случае, при близких и сверхблизких расстояниях до барьера (до 0,1 мм), хорошо прослеживается мелкоочаговая структура чехла короны. При переходе к дальним расстояниям, при расстоянии 0,1 мм, на фоне мелкоочаговой боковой структуры появляется сплошное свечение у кончика острия, которое при расстоянии 0,5 мм приобретает вытянутую форму, похожую на сосульку. С увеличением расстояния от иглы до барьера длина чехла короны уменьшается и при расстоянии 2 мм принимает форму, характерную для положительной короны без барьера (рис.2.13).

Основные отличия отрицательного разряда от положительного можно сформулировать так:

- вольтамперные характеристики положительной короны более пологие и почти линейные,
- отмечается гистерезис – прямой и обратный участки вольтамперной характеристики заметно различаются,
- на фоне общего плавного изменения тока видны импульсные выбросы, сопровождаемые поверхностными стримерами,
- напряжение зажигания положительной короны при малых (0÷100 мкм) расстояниях от кончика иглы до барьера лежит на уровне 20÷25 кВ,
- в этом диапазоне малых расстояний, от 0 до 100 мкм, регистрируется облегающая лавинная форма чехла короны, сосредоточенная на боковой поверхности иглы, приподнятая относительно кончика иглы на расстояние 1÷2 мм. Структура чехла короны мелкозернистая, размеры

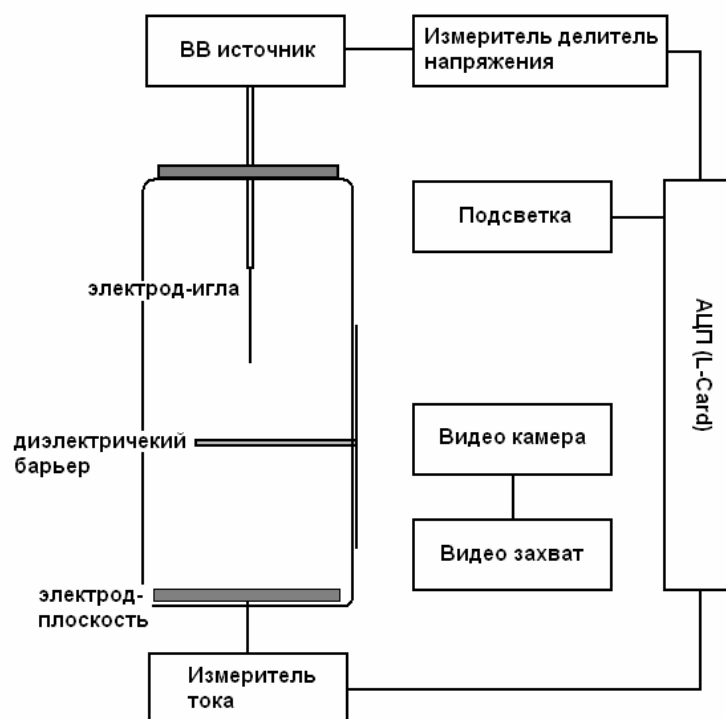
отдельных очагов короны порядка единиц микрометров, очаги равномерно распределены по боковой поверхности иглы до уровня  $5\div 10$  мм от поверхности изолятора,

- по мере увеличения расстояния от кончика иглы до барьера наблюдается сползание нижней границы чехла к кончику иглы. При расстояниях около  $300\div 500$  мкм происходит постепенный переход зернистой боковой формы чехла короны к сферической форме, сосредоточенной у кончика иглы. Этот переход виден на фотографиях полученных при расстоянии до барьера 750 мкм и выше, и происходит через промежуточную, вытянутую как сосулька, форму;
- на фоне описанных квазистационарных форм периодически образуются стримерные формы, «стартующие» с боковой поверхности иглы и распространяющиеся параллельно изолятору.

### 3. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из следующих блоков:

1. Экспериментальный сосуд, представляет собой прямоугольный ящик из плексигласа, в котором расположена система электродов «игла над плоскостью» (рис.3.1). На верхний электрод – «иглу» подается высокое напряжение, нижний электрод «заземлен» через систему измерения тока. Межэлектродное расстояние может изменяться по желанию экспериментатора. На одной из стенок кюветы закреплен диэлектрический барьер. Расстояние от электрода – «иглы» до барьера может варьироваться с помощью микрометрического винта (цена деления 10 мкм).
2. Высоковольтный источник – двуполярный источник регулируемого высокого напряжения ВИНД–30 (ООО «ОСТ»).
3. Измерительный делитель напряжения собран на высоковольтных сопротивлениях и делит выходное напряжение в  $10^4$  раз, что позволяет измерять его с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), верхний предел измеряемого напряжения которого составляет 5 В. В качестве АЦП использовалась плата L-761-D (*L-card*).
4. Измеритель тока представляет собой сопротивление 10 кОм с элементами защиты измерительной аппаратуры от перенапряжения, на котором измеряется падение напряжения.
5. Блок подсветки служит для синхронизации регистрируемых в экспериментах видеоизображений с электрическими характеристиками. Источник синхронизации – светодиод, подключенный к цифро-аналоговому преобразователю (ЦАП), установленному на плате АЦП.



**Рисунок 3.1.** Блок-схема экспериментальной установки.

6. Блок видеоканала состоит из двух высокочувствительных (0,005лк,  $f=1,4$ ) видеокамер *VSC-746* (ООО «ЭВС») с блоком питания, монитора и платы видеозахвата *Контраст–USB2.0*, и предназначен для наблюдения на экране монитора и регистрации в компьютер изображений коронного разряда.
7. Блок регистрации электрических параметров состоит из устройства АЦП (+ЦАП), установленного в системный блок компьютера и служит для регистрации следующих параметров: напряжение на выходе высоковольтного источника, электрический ток, протекающий между электродами – напряжение с измерительного сопротивления 10 кОм и сигнал синхроимпульса, подаваемый на светодиод.
8. Компьютер с установленной платой АЦП (+ЦАП) используется для регистрации и хранения экспериментальных данных и их дальнейшей обработки.

Исследование униполярного коронного разряда проводится в системе электродов «игла – плоскость». Это система с сильно неоднородным электрическим полем. Её использование позволяет существенно разделить напряжение зажигания коронного разряда и напряжение искрового пробоя межэлектродного промежутка. Игла имеет форму параболоида вращения с максимальным диаметром 1,6 мм у основания и радиус скругления острия – 0,1 мм. Диэлектрический барьер представляет собой диск из электроизолирующего материала, например плексигласа. В сочетании с использованием дополнительной защиты

измерительных каналов от перенапряжения используемая система позволяет производить измерения малых токов без угрозы пробоя и выведения из строя используемого оборудования.

Электрические параметры процесса зажигания коронного разряда регистрируются при помощи аналого-цифрового преобразователя L-761-D (*L-Card*). Полученные данные обрабатывались в пакете программ *Matlab* (*The MathWorks, Inc.*). После этого на полученной вольтамперной характеристике разряда выделялись значения, которые соответствовали выбранному кадру записанного видеоряда.

В первой группе исследований необходимо изучить влияние барьера на напряжение зажигания коронного разряда.

#### **4. Принцип работы стенда**

На электрод в выбранном режиме подается высокое напряжение. Если напряжение выше критического, на конце иглы возникает коронный разряд, который регистрируется видеокамерами. В установке используется две видеокамеры, а программы регистрации видеоизображения позволяют работать только с одной. Используемая в этой работе плата видеозахвата *Контраст-USB2.0* позволяет подключить к ней сразу две (до четырех) камеры и выводить на монитор и/или записывать информация с любой из них. Выбор рабочей видеокамеры осуществляется из программы видеозахвата (подробнее об этом будет сказано ниже).

Параллельно с регистрацией видеоизображения, используя АЦП, можно регистрировать электрические параметры (напряжение, ток, синхроимпульс). Синхроимпульс подается на светодиод (рис.3.1,б) и может быть использован для синхронизации видеоизображения и электрических параметров, т.к. вспышка светодиода, при подаче на него синхроимпульса, видна всего на одном полукадре.

#### **5. Задание на предварительную подготовку**

- Оценить напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд в воздухе при атмосферном давлении, если радиус кривизны иглы 0,01 мм.
- Рассчитать поле в среде *ANSYS* для системы электродов игла-плоскость. Оценить размер чехла короны.
- Рассчитать поле в среде *ANSYS* для системы электродов игла-плоскость с диэлектрической вставкой в межэлектродном промежутке.

#### **6. Задания на проведение работы**

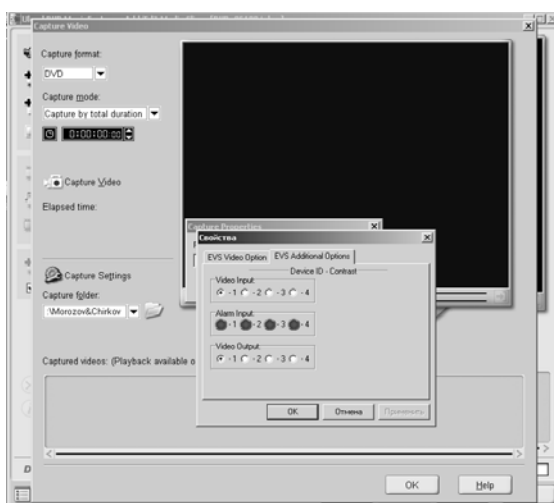
- Получить вольтамперные характеристики разряда в воздухе для разных расстояний от иглы до барьера при положительном и отрицательном напряжении,
- Зарегистрировать и описать наблюдаемые формы коронного разряда и

сопоставить различные формы коронного разряда соответствующим участкам вольтамперной характеристики,

- Исследовать полученные вольтамперные характеристики, сравнить их.

## 7. Порядок проведения экспериментов

1. Подготовить установку для проведения экспериментов. Для этого:
  - 1.1. Включить для прогрева контрольно-измерительные приборы
  - 1.2. Включить компьютер. Подключить компьютер к лабораторной установке
  - 1.3. Включить подсветку межэлектродного промежутка. Для этого:
    - 1.3.1. проверить подключение светодиода к источнику питания,
    - 1.3.2. подать напряжение на диод (не более 4 В),
    - 1.3.3. проверить, что пучок света освещает межэлектродное пространство и оба электрода. Это можно сделать невооруженным глазом.
  - 1.4. Включить программу регистрации видеоизображения в компьютер для его дальнейшей обработки **Ulead DVD Movie Factory**, или аналогичную.
  - 1.5. Включить видеокамеры и провести их настройку. Для этого:
    - 1.5.1. используя программу регистрации видеоизображения выбрать режим *Capture Video (Видеозахват)*, в пункте *Capture Setting (Установки Видеозахвата)* выбрать *Capture Properties (Свойства видеозахвата)* и открыть закладку *EVS Additional Options (Дополнительные настройки ЭВС)*.
    - 1.5.2. В верхнем ряду открывшегося окна (рис.7.1) выбирать номер видеокамеры, изображение с которой будет записано в компьютер, а в нижнем ряду выбирать номер видеокамеры, изображение с которой будет выводиться на монитор.



**Рисунок 7.1.** Окно для выбора рабочей видеокамеры при работе с платой видеозахвата Контраст USB2.0.



- 1.5.3. Вывести на монитор компьютера изображение с одной из камер. Проверить фокусировку камеры и установку диафрагмы. Диафрагму предварительно стоит полностью открыть и постараться сфокусировать видеокамеру на электроде-игле. Если «картинка» получается не очень четкой, можно немного уменьшить диафрагму. Эту процедуру повторить с каждой видеокамерой.
- 1.6. В программе регистрации видеоизображения настроить яркость и контрастность изображения, которое будет записываться в компьютер для дальнейшей обработки.
- 1.7. Проверить, что вспышка светодиода, на который подается синхроимпульс, видна на изображениях от всех камер.
- 1.8. Запустить программу *L-graf*, которая используется для регистрации электрических параметров эксперимента с помощью АЦП, или программу *L-Card-explorer 5*, написанную с участием студентов направления «Прикладные математика и физика» физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, которая позволяет использовать ЦАП, установленный на плате АЦП. Установить частоту квантования сигналов 1 кГц, если не требуется другая величина.
- 1.9. Настроить остальные рабочие параметры программ.
2. Зарегистрировать формы коронного разряда. Для этого:
  - 2.1. Выбрать полярность напряжения, с которой планируется работать.  
**Внимание! Все переключения в высоковольтных установках производятся при отключенном питании и только преподавателем.**
  - 2.2. Выбрать ручной режим управления выходным напряжением высоковольтного источника.
  - 2.3. Повышая выходное напряжение получить на экране монитора интересующую форму коронного разряда. Для выравнивания яркости свечения коронного разряда можно использовать внешнее освещение.
  - 2.4. Записать несколько отдельных кадров или очень короткий видеоряд. Для записи отдельных кадров необходимо:
    - 2.4.1. Выключить программу *Ulead DVD Movie Factory* регистрации видеоизображения.
    - 2.4.2. Включить программу *EVSCap* (ООО «ЭВС», г. Санкт-Петербург), которая позволяет регистрировать стоп-кадр (рис.7.2).



**Рисунок 7.2.** Рабочее окно программы EVSCap

- 2.5. Записать электрические параметры в течение одной - двух секунд.
- 2.6. Повторить запись для другого напряжения.
- 2.7. Проверить качество записанных данных.
3. Получить вольтамперную характеристику разряда в воздухе. Для этого:
  - 3.1. Выбрать режим внешний режим управления напряжением на выходе высоковольтного источника.
  - 3.2. На генераторе сигналов специальной формы, который используется как модулятор выходного напряжения с высоковольтного источника, установить треугольную ( $\sqrt{\wedge}$ ) форму сигнала.
  - 3.3. Установить выходное напряжение амплитудой 1 В и частотой 0,05 Гц.
  - 3.4. Ручку регулировки выходного напряжения на модуле управления ВВ-источника установить в начальное, нулевое положение. Включить ВВ-источник
  - 3.5. Плавно увеличивать амплитудное значение выходного напряжения на выходе ВВ-источника до уровня 5-10 кВ. **Внимание!** Длительность одного периода сигнала составляет 20 секунд, т.е. напряжение меняется от 0 до максимального за 5 (пять) секунд, поэтому напряжение надо изменять медленно, дожидаясь, пока оно достигнем максимума. Контролировать напряжение «в реальном времени» можно по вольтметру, установленному на модуле управления высоковольтного источника, и/или, с небольшой задержкой, по цифровому осциллографу, в качестве которого используется программа L-graf или L-Card-explorer 5.
  - 3.6. Убедитесь, что за период подачи высокого напряжения появляется коронный разряд, и понизьте частоту выходного сигнала на

задающем генераторе до 0,01 Гц. **Внимание!** При изменении частоты выходного сигнала выходное напряжение ВВ-источника немного повышается.

- 3.7. Приготовьте программы *L-graf* и *Ulead DVD Movie Factory* к записи данных в компьютер. Длительность записи составит примерно 100 секунд, т.е. длительность одного периода сигнала с задающего генератора.
- 3.8. Дождитесь, когда напряжение на выходе высоковольтного генератора станет равным нулю, и включите запись электрических параметров и видеосигнала. Программа *Ulead DVD Movie Factory* позволяет управлять длительностью видеозаписи как программно, т.е. задавая длительность видеозаписи, или вручную, т.е. самостоятельно выбирать время начала и окончания записи.
- 3.9. По окончании записи сигналов, вывести выходное напряжение на ноль и проверить качество записанной информации. При необходимости эксперимент придется повторить. **Внимание!** На видеозаписи и записи электрических параметров должен быть один и тот же синхроимпульс. При отсутствии синхроимпульса или не достаточном качестве записанных данных эксперимент лучше повторить.
- 3.10. Обработать полученные данные (о методах обработки экспериментальных данных будет сказано ниже) и построить вольтамперную характеристику разряда в воздухе.
4. Зарегистрировать формы коронного разряда и получить вольтамперные характеристики для другой полярности высокого напряжения. Для этого:
  - 4.1. Переключить полярность подаваемого напряжения. **Внимание! Все переключения в высоковольтных установках производятся при отключенном питании и только преподавателем.**
  - 4.2. Повторить пункты 2.-4.

## 8. Обработка экспериментальных данных

При записи данных эксперимента мы получаем следующие типы файлов: \*.dat, \*.par, \*.avi. Первые два типа файлов содержат информацию об электрических параметрах эксперимента, первый – сами отсчеты всех регистрируемых каналов, второй – параметры регистрации данных, такие как частота дискретизации, количество отсчетов, коэффициенты усиления каждого канала и т.п., третий тип файлов содержит видеоинформацию. Работать предстоит, в основном, с первым и третьим типами файлов.

Электрические параметры экспериментов регистрируются в отсчетах, которые надо переводить в абсолютные значения. Кроме того, формат представления данных в файле \*.dat не позволяет работать с ним без предварительной подготовки, которая, в данном случае, заключается в

изменение формата данных. Это делается с помощью программы *bin2mat*, или с помощью программы *Signal\_converter*, написанной с участием студентов направления «Прикладные математика и физика» физического факультета СПбГУ и позволяющей конвертировать файлы \*.dat в файлы \*.mat. При этом с помощью программы *Signal\_converter* сделать это гораздо проще, достаточно просто подвести курсор к нужному файлу и нажать правую кнопку «мышки» и в открывшемся меню выбрать строчку *Конвертировать в mat-файл*. Получаем файл с расширением \*.mat, с которым и предстоит работать дальше. Данные в этом файле расположены по порядку, т.е. сначала идут первые отсчеты каждого канала, по-очереди, потом вторые отсчеты каждого канала и так далее. Подробнее с работой АЦП можно в высоковольтной лаборатории или в лаборатории ФОМПИ направления ПМФ физического факультета СПбГУ по описанию соответствующей лабораторной работы.

Обычно, как и в этой работе, первый канал АЦП регистрирует величину напряжения, подаваемого на электрод, второй – ток, протекающий между электродами.

Если форма коронного разряда записана в видеофайл, то его стоит разложить на отдельные кадры, которые, в дальнейшем, можно использовать при анализе результатов эксперимента. Если на кадрах записаны импульсные процессы, то для анализа результатов удобнее использовать полукадры, которые, обычно, выглядят четче и контрастней.

Для разложения видеоряда на отдельные кадры или полукадры можно использовать программу *РазложениеВидео*, написанную студентами направления «Прикладные математика и физика» для обработки видеофайлов в среде *Matlab*.

## 9. Контрольные вопросы

- Что такое самостоятельный разряд и каковы его основные характеристики,
- Чем отличается самостоятельный разряд от несамостоятельного,
- Какие еще виды электрического разряда вы знаете, и каковы их основные характеристики.

## 10. Рекомендуемая литература

1. F.W.Peek, JR. Dielectric phenomena in high-voltage engineering. // McGRAW-HILL book company. London. 1929.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда.: М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1992. 536с.
3. Г.А.Остроумов. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей, М. Наука, 1979.
4. И.П. Верещагин. Коронный разряд в аппаратах электронно – ионной технологии. Энергоатомиздат. Москва. 1985г. Стр.11-20.

5. И.М. Бортник, И.П. Верещагин и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений. Энергоатомиздат. Москва. 1993г. Стр. 207 – 208.
6. Д.В. Сивухин, Общий курс физики. Электричество. М.: Наука, 1983.
7. Орешко А.Г., О структуре приэлектродных областей в коронном разряде. XXX Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Московская область, г. Звенигород, 24-28 февраля 2003. – М.: Московский авиационный институт. 2003.
8. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, под ред. академика В.Е. Фортова: М.: Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000.
9. С.Б. Афанасьев, И.Н. Петрушенко, Ю.К. Стишков, Некоторые особенности коронного разряда и электрического ветра в воздухе, Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006 г. Санкт-Петербург.
10. С.Б. Афанасьев, Ю.А. Зарядов, А.С. Воинов, М.А. Морозов, Ю.К. Стишков Влияние барьерной изоляции на характер коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», июнь 2006 г. Санкт-Петербург.

## 11. Приложения

В работе использованы следующие программные продукты:

- *L-card-explorer 5*
- *L-graf*
- *EVSCap*,
- *Ulead DVD Movie Factory*
- *matlab\_converter*
- *bin2mat*
- *РазложениеVideo*
- *BAR1-BAR3*
- *trec1*

## Лабораторная работа №5

### **Экспериментальное исследование импульсного пробоя воздушного промежутка при наличии барьерной изоляции**

Работа направлена на исследование одной из актуальных проблемы электрофизики газов направленных на повышение пробивной прочности газовых промежутков при помощи барьерной изоляции. Целью работы является изучение физических процессов в области импульсных предпробойных напряжений и влияния диэлектрических вставок в межэлектродном пространстве на процессы, происходящие в газовой среде при воздействии стандартного грозового импульса.

#### **1. Цель работы**

Провести экспериментальное исследование особенностей импульсного пробоя воздушного промежутка при наличии барьерной изоляции:

1. Исследовать предпробойные процессы в специальной системе электродов при различных напряжениях.
2. Зарегистрировать стримерную форму пробоя.
3. Провести компьютерное моделирование распределения электрического поля в электростатическом приближении без учёта и с учетом поверхностного заряда на барьерной изоляции. Получить распределение напряженности электрического поля.
4. Исследовать распределение поверхностного заряда по барьеру в режиме стримерного разряда и без него.
5. Провести анализ данных и написать подробный отчет.

#### **2. Предварительные сведения.**

##### ***Разрядные напряжения воздушных промежутков при импульсных напряжениях.***

При кратковременных импульсах разрядное напряжение воздушных промежутков зависит от продолжительности воздействия. Если к промежутку приложено напряжение, достаточное для пробоя, то для развития и завершения разряда в нём необходимо определенное время  $t_p$ , называемое временем разряда.

Развитие самостоятельного разряда начинается с появления в промежутке эффективного начального электрона, что является случайным событием. Время ожидания начального электрона  $t_c$  подвержено разбросу и называется, поэтому, статистическим временем запаздывания разряда.

Это первая составляющая времени разряда. Другой составляющей, имеющей также статистический характер, является время формирования разряда  $t_{\phi}$ , т.е. время от момента появления начального электрона до завершения пробоя промежутка. При достаточно большой длительности фронта импульса имеет значение также холостое время  $t_x$ , представляющее собой время подъема напряжения до начального значения  $U_H$ . Таким образом, в общем случае время разряда определяется как

$$t_p = t_x + t_c + t_{\phi}$$

Если длительность приложенного к промежутку импульса меньше времени разряда, то пробой не произойдет, хотя значение напряжения было бы достаточным для этого при длительном приложении напряжения.

Статистическое время запаздывания разряда в промежутках с однородным электрическим полем связано с действием внешних ионизаторов. Естественные ионизаторы – это космические частицы и излучение радиоактивных элементов земной коры, а искусственные – ультрафиолетовое излучение ртутно-кварцевых ламп, излучение радиоактивных препаратов.

За счет естественной ионизации в воздухе у поверхности земли за 1 с в  $1 \text{ см}^3$  образуется  $10 \div 20$  электронов. Судьба этих электронов в разрядном промежутке различна. Одни из них рекомбинируют с положительными ионами, захватываются электроотрицательными частицами, в основном молекулами кислорода и парами воды, другие рассеиваются, уходят из промежутка в результате взаимодействия с частицами газа. Некоторые электроны образуют лавины, не приводящие к самостоятельному разряду. И, наконец, есть эффективные электроны, способные создать лавины критической длины, что означает самостоятельный разряд в промежутке.

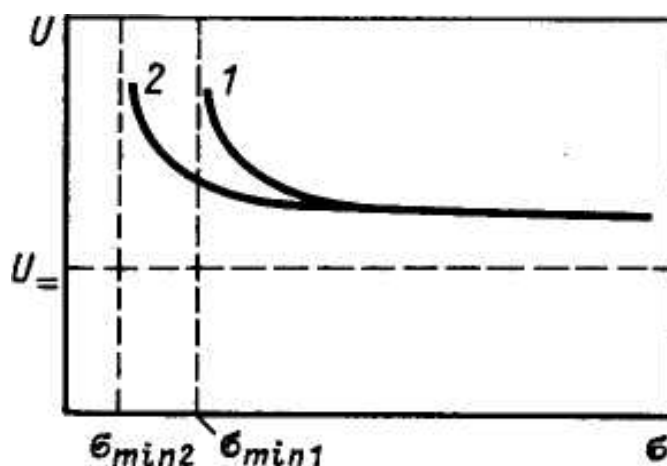
Если  $\beta$  – среднее число электронов, появляющихся в разрядном промежутке за 1 с,  $P$  – вероятность того, что электрон станет эффективным, то  $\beta \cdot P$  – среднее число эффективных электронов, появляющихся в промежутке за 1 с. Среднее статистическое время запаздывания разряда определяется как

$$\sigma = \frac{1}{\beta P}.$$

Вероятность  $P$  при определенном состоянии газа зависит, прежде всего, от напряжения на промежутке, и она тем больше, чем выше напряжение, поскольку с ростом напряжения сокращаются вероятности прилипания электронов к электроотрицательным частицам, их рассеивания и образования электронами неэффективных лавин. Поэтому чем выше

напряжение на промежутке, тем меньше среднее статистическое время запаздывания разряда.

При значительном возрастании напряжения  $P \approx 1$  и  $\sigma$  стремится к минимальному значению  $\sigma_{min} = 1/\beta$ . Искусственное облучение промежутка создает дополнительное число электронов, т.е. увеличивается значение  $\beta$  и  $\sigma_{min}$  становится меньше (рис.2.1). Эффект облучения промежутка используется при измерениях с помощью шаровых разрядников малых напряжений (невелик объем газа между электродами) или напряжений очень коротких импульсов (меньше 1 мкс). При отсутствии облучения в том и другом случаях  $\beta$  очень мало и соответственно велико  $\sigma$ , что при приемлемой продолжительности опыта приводит к искажению результатов измерения в сторону завышения напряжения, поскольку значительное уменьшение  $\beta$  компенсируется при повышенном напряжении ростом вероятности  $P$ .



**Рисунок 2.1.** Эффект искусственного облучения разрядного промежутка со слабонеоднородным полем (качественно): 1 – без облучения; 2– с облучением

Фактические значения статистического времени запаздывания разряда  $t_c$  отличаются от среднего. Для определения закона распределения  $t_c$  будем предполагать, что имеется  $n_0$  промежутков с однородным полем и малым расстоянием между электродами. В этом случае временем формирования разряда  $t_\phi$  можно пренебречь и считать, что  $t_\phi \approx t_c$ . К  $n_0$  промежуткам приложено напряжение, и к моменту  $t$  часть из них пробилась. Непробитыми остались  $n$  промежутков. В последующий интервал времени  $dt$  пробьются  $dn$  промежутков. Уменьшение числа непробитых промежутков составит

$$-dn = n\beta P dt, \quad (2.1)$$



где  $\beta P dt$  – среднее число эффективных электронов, образующихся в промежутках за время  $dt$ .

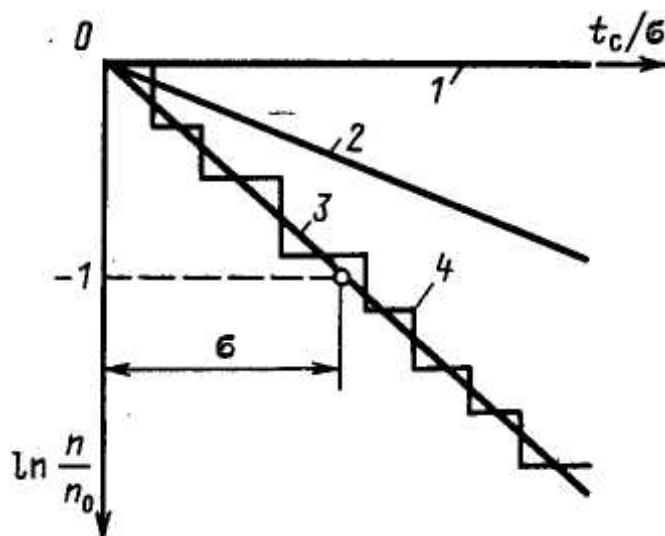
Разделяя переменные в (2.1) и интегрируя выражение, получаем

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\beta P t} = e^{-t/\sigma}.$$

Значения  $n/n_0$  можно интерпретировать как вероятность пробоя одного промежутка при статистическом времени запаздывания  $t_c$ :

$$P(t_c) = e^{-t_c/\sigma}.$$

На рис.2.2 представлены качественные зависимости  $\ln[P(t_c)] = -t_c/\sigma$  при разных отношениях приложенного напряжения  $U$  к разрядному  $U_*$  при длительном воздействии. При  $U = U_*$  среднее статистическое время запаздывания  $\sigma = \infty$ . С увеличением напряженности  $\sigma$  уменьшается. Если  $t_c = \sigma$ , то  $\ln[P(\sigma)] = -1$  и  $P(\sigma) = 1/e$ .



**Рисунок 2.2.** Качественные зависимости  $\ln(n/n_0) = -t_c/\sigma$  при разных отношениях приложенного напряжения к разрядному  $U_*$  при длительном воздействии: 1 –  $U/U_* = 1$ ; 2 –  $U_1/U_* > 1$ ; 3 –  $U_2/U_* \gg U_1/U_*$ ; 4 – эксперимент.

В промежутках с неоднородным электрическим полем облучение не играет роли, поскольку у электрода с меньшим радиусом кривизны, вблизи которого начинается разряд, свободные электроны появляются в результате распада отрицательных ионов. Этот процесс в воздухе идет при  $E/p > 45$  В/(см·ммНг), что соответствует, при нормальном давлении, напряженности электрического поля  $E = 34$  кВ/см. Статистическое время запаздывания невелико и имеет значительно меньший разброс, чем в

промежутках с однородным полем, так как процесс распада отрицательных ионов, можно сказать, достаточно регулярен. Как и в однородном поле, имеет место зависимость  $t_c$  и  $\sigma$  от напряжения.

Время формирования разряда  $t_\phi$  в общем случае содержит три составляющие:

$$t_\phi = t_{лав} + t_{стр} + t_{эл} = \frac{x_{ка}}{u_e} + \frac{L - x_{кр}}{v_{стр}} + \frac{L}{v_{эл}} \quad (2.2)$$

где  $t_{лав}$  – время прохождения лавиной критической длины  $x_{кр}$ ;  $t_{стр}$  – время развития стримера;  $t_{эл}$  – время развития главного разряда;  $L$  – расстояние между электродами;  $u_e$  – скорость дрейфа электронов;  $v_{стр}$  и  $v_{эл}$  – скорости развития стримера и главного разряда.

Скорость  $v_{эл}$  имеет порядок  $10^9$  см/с, поэтому третьим слагаемым в (2.2) можно пренебречь. Учитывая, что  $u_e$  имеет порядок  $10^7$  см/с и  $v_{стр} = 10^8$  см/с, при малых расстояниях между электродами время формирования можно определить как

$$t_\phi \approx \frac{L}{u_e}.$$

При разряде в однородных полях с расстояниями между электродами порядка единиц сантиметров  $t_\phi$  составляет десятые доли микросекунды, что значительно меньше статистического времени запаздывания, которое может достигать десятков микросекунд.

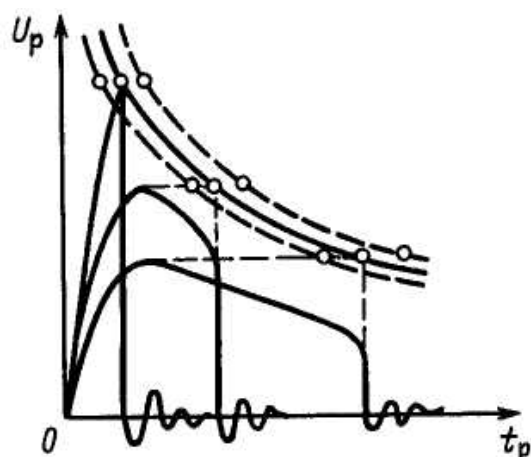
При больших длинах промежутков с неоднородным полем ( $L \gg x_{кр}$ )

$$t_\phi \approx \frac{L}{v_{стр}}.$$

В этом случае  $t_\phi$  больше  $t_c$  и существенно зависит от напряжения на промежутке. Вследствие некоторого различия в траекториях разрядов  $t_\phi$  подвержены статистическим разбросам, поэтому обычно пользуются средним временем формирования, обозначаемым  $\tau$ .

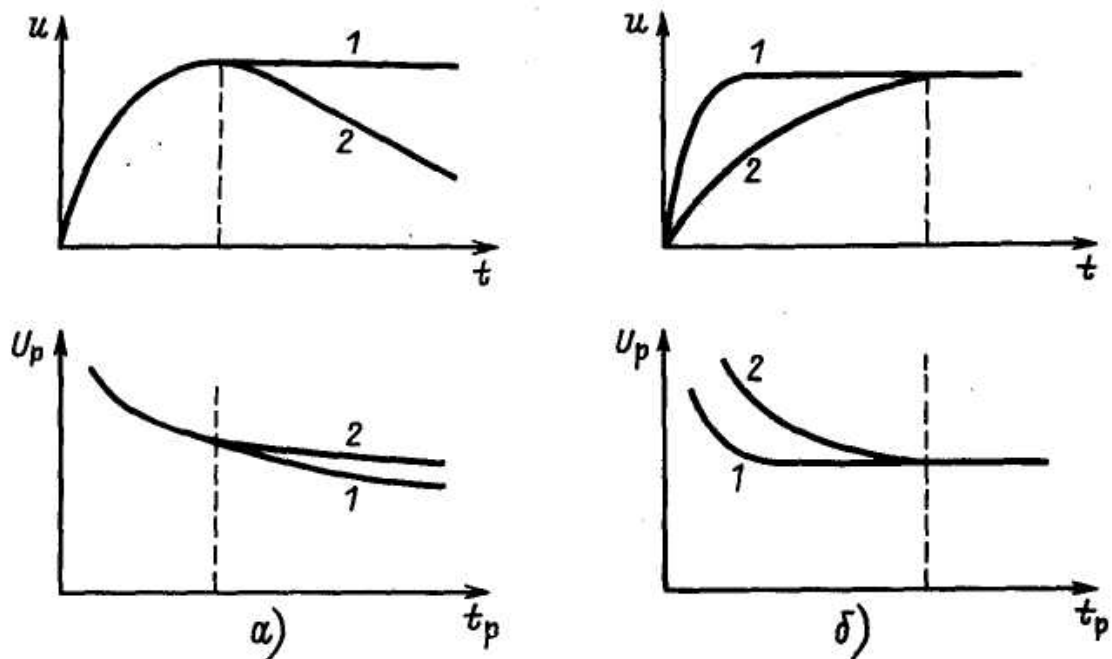
Составляющие времени разряда  $t_c$  и  $t_\phi$ , а значит, и время разряда  $t_p$  при неизменном состоянии газа зависят от значения напряжения на промежутке. При увеличении напряжения повышается вероятность того, что появляющиеся в промежутке электроны станут эффективными, и  $t_c$  уменьшается. Сокращается также и  $t_\phi$ , поскольку при большем напряжении возрастает интенсивность разрядных процессов в промежутке. Поэтому чем выше разрядное напряжение, тем меньше время разряда, или, по-другому, чем короче импульс, тем выше разрядное напряжение.

Зависимость максимального напряжения импульса от времени разряда называется вольт-секундной характеристикой промежутка.



**Рисунок 2.3.** Построение вольт-секундной характеристики по опытным данным (грозовые импульсы).

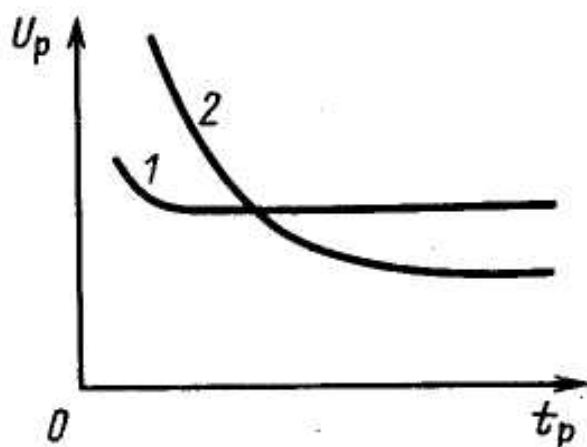
Для экспериментального определения вольтамперной характеристики на исследуемый промежуток подаются импульсы стандартной формы. При каждом значении максимального напряжения импульса производится серия опытов. В силу статистического разброса времени разряда вольт-секундная характеристика получается в виде области точек (рис.2.3), для которой указываются средняя кривая и границы разброса времени разряда.



**Рисунок 2.4.** Примерная форма вольт-секундных характеристик при разных длительностях импульса (а) и разных длительностях фронта импульса (б)

Поскольку начало и скорость развития ионизационных процессов зависят от значения напряжения, то вольт-секундные характеристики зависят от формы импульса. На рис.2.4 представлены примерные формы вольт-секундных характеристик при импульсах, имеющих разную крутизну нарастания напряжения – длительность фронта, и различную скорость спада напряжения после максимума. Большим значениям напряжения на фронте или на хвосте импульсов соответствуют меньшие времена разряда на вольт-секундных характеристиках.

Вид вольт-секундной характеристики зависит от степени неоднородности электрического поля в промежутке. Для промежутков с однородным или слабонеоднородным полем вольт-секундная характеристика практически параллельна оси абсцисс (рис.2.5, кривая 1). Разрядные напряжения при временах разряда порядка 1 мкс и меньше увеличиваются вследствие малой вероятности появления эффективного электрона при столь коротких воздействиях напряжения. В этой части характеристики наблюдается заметный разброс разрядных напряжений. Отмеченные свойства вольт-секундной характеристики позволяют использовать промежуток между шаровыми электродами, создающий практически однородное поле, если расстояние между электродами меньше их радиуса, в качестве универсального прибора для измерения максимальных значений напряжения.



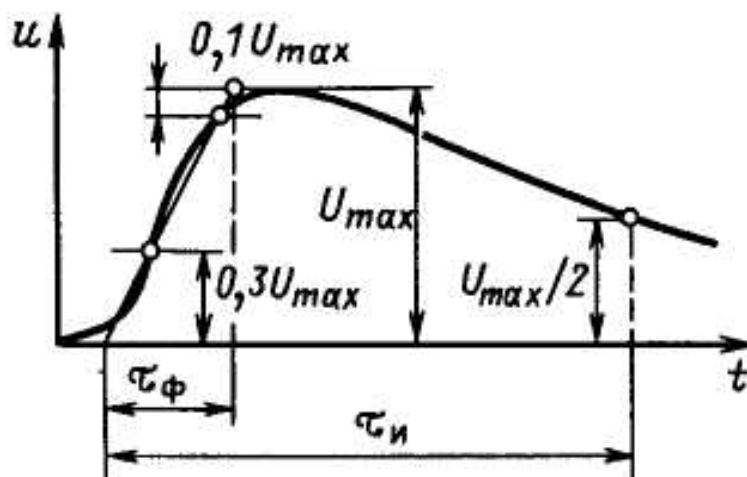
**Рисунок 2.5.** Вид вольт-секундных характеристик для промежутков с однородным (1) и резко неоднородным (2) электрическими полями (грозовые импульсы).

Вольт-секундные характеристики промежутков с резко неоднородным полем (рис.2.5, кривая 2) имеют достаточно большую кривизну, поскольку в таких промежутках время формирования очень сильно зависит от значения приложенного напряжения. Для таких

промежутков характерны большие импульсные разрядные напряжения  $U_p$ , чем при переменном напряжении  $U_{\sim}$  с частотой 50 Гц. Отношение

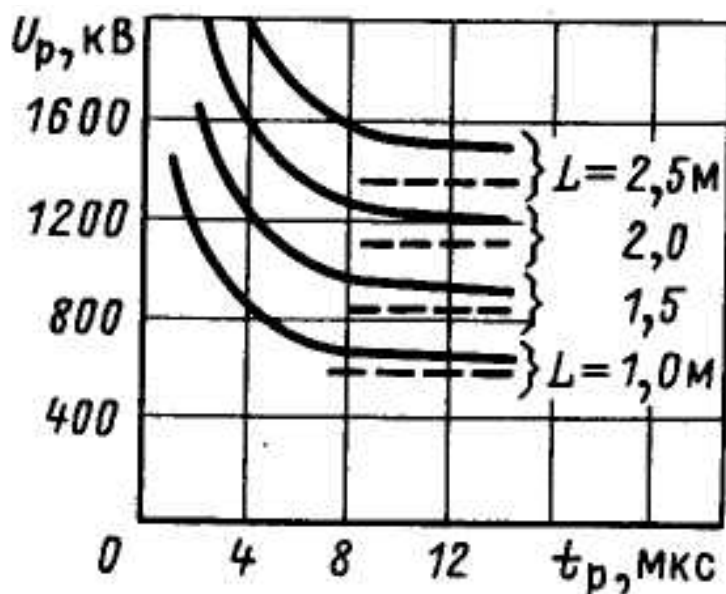
$$K_{имп} = \frac{U_p}{U_{\sim}}$$

называется коэффициентом импульса и обычно относится к определенному времени разряда.



**Рисунок 2.6.** Определение параметров грозового импульса

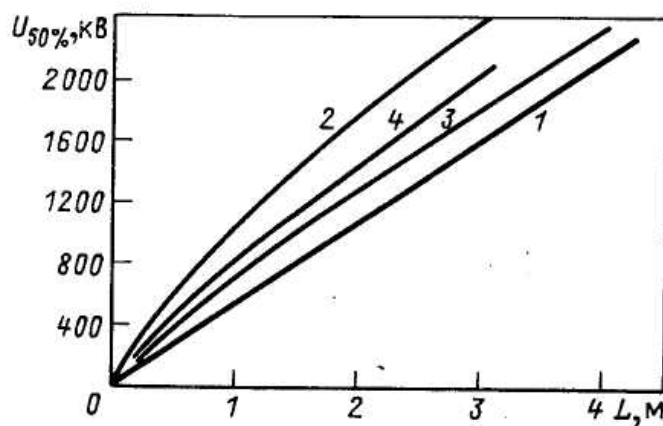
Промежутки с однородным и слабонеоднородным полями имеют  $K_{имп} = 1$  практически во всем диапазоне времен разряда.



**Рисунок 2.7.** Вольт-секундные характеристики воздушных промежутков стержень-стержень при стандартных грозовых импульсах: пунктир – разрядные напряжения при частоте 50 Гц.

В целях унификации испытаний и возможности сопоставления их результатов в электроэнергетике установлен стандартный грозовой импульс, имитирующий форму перенапряжений, возникающих в электроустановках при ударе в них молнии. Определение параметров импульса – длительности фронта  $\tau_\phi$  и длительности импульса  $t_u$  – показано на рис.2.6. Стандартный грозовой импульс имеет  $\tau_\phi = 1,2 \pm 0,36$  мкс и  $\tau_u = 50 \pm 10$  мкс. Кратко он обозначается 1,2/50 мкс со знаком плюс или минус в зависимости от полярности. На рис.2.7 представлены для примера вольт-секундные характеристики промежутков стержень-стержень при грозовых импульсах.

При уменьшении напряжения импульса, по сравнению с представленным на рис.2.7, время разряда возрастает. Из-за статистического разброса значений  $t_\phi$  и  $t_c$  разряд успевает завершиться не во всех опытах. Чем ниже напряжение импульса, тем меньше вероятность возникновения разряда в промежутке. Характерным является 50 %-ное разрядное напряжение  $U_{50\%}$ , т.е. то напряжение импульса, при котором разряд в промежутке возникает в 50% опытов. Импульсные 50 %-ные напряжения промежутков стержень-плоскость и стержень-стержень представлены на рис.2.8.



**Рисунок 2.8.** Разрядные 50 %-ные напряжения воздушных промежутков при стандартных грозовых импульсах: 1 – положительный стержень-плоскость; 2 – отрицательный стержень-плоскость; 3 – стержень-стержень при положительной полярности незаземленного стержня; 4 – стержень-стержень при отрицательной полярности незаземленного стержня.

Распределение разрядных напряжений соответствует нормальному закону. В качестве минимального разрядного напряжения часто принимается

$$U_{p \min} = U_{50\%} - 3\sigma ,$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение от  $U_{50\%}$ . Вероятность того, что разрядное напряжение может оказаться меньше  $U_{p \min}$ , составляет 0,135 %.

Чтобы охарактеризовать промежуток с неоднородным полем, во многих случаях бывает достаточно привести 50%-ное разрядное напряжение и разрядное напряжение при времени разряда  $2 \div 3$  мкс.

Вольт-секундная характеристика при стандартных грозовых импульсах может быть построена по эмпирическому уравнению (метод Горева-Машкиллейсона):

$$U_p = A \sqrt{1 + \frac{T}{t_p}} ,$$

где  $A$  и  $T$  – постоянные для рассматриваемого промежутка, которые находятся экспериментально по двум точкам вольт-секундной характеристики. После этого, задаваясь значениями времени разряда  $t_p$ , определяют соответствующие разрядные напряжения  $U_p$  и строят среднюю вольт-секундную характеристику.

Другой метод (Д.Кинд, 1957 г.) более универсален. Предполагается, что скорость развития стримера в промежутке пропорциональна разнице напряженностей поля – фактической и начальной:

$$v(x, t) = \frac{dx}{dt} = k[E(x, t) - E_H(x)] ,$$

где  $x$  – пространственная координата. Искажение поля при развитии разряда не учитывается.

Поскольку  $E(x) = Ug(x)$ , где  $g(x)$  — геометрический фактор, то

$$\frac{dx}{dt} = kg(x)[U(t) - U_H] .$$

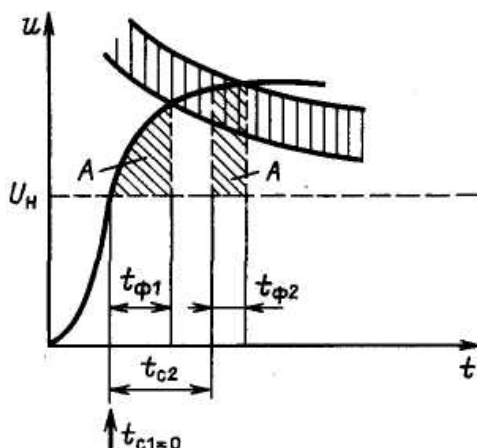
Разделяя переменные, получаем

$$\int_0^L \frac{1}{k g(x)} dx = \int_{t_c}^{t_c + t_\phi} [U(t) - U_H] dt \quad (2.3)$$

Видно, что интеграл в правой части (2.3) постоянен для определенного промежутка, характеризуемого  $g(x)$ , поэтому

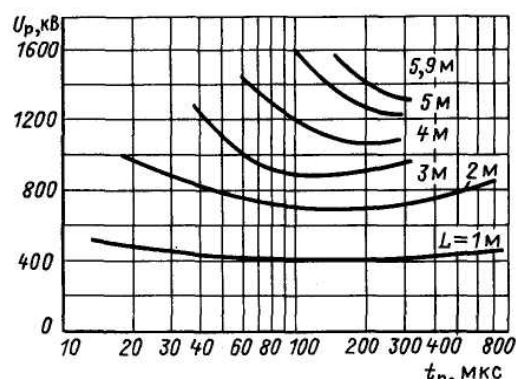
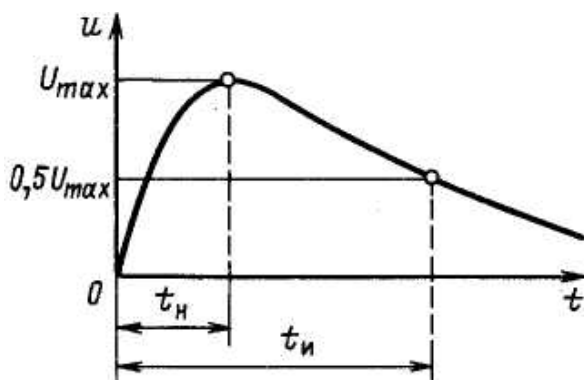
$$\int_{t_c}^{t_c+L\phi} [U(t) - U_H] dt = A \quad (2.4)$$

представляет собой критерий пробоя промежутка и может быть использован для построения вольт-секундной характеристики этого промежутка при импульсных напряжениях (рис.2.9).



**Рисунок 2.9.** Построение вольт-секундной характеристики по (2.4): частая штриховка – площади, равные  $A$ ; редкая штриховка – область вольт-секундной характеристики

В (2.4)  $t_c$  соответствует началу формирования разряда. Значения  $A/L$  для промежутков стержень-плоскость составляют при положительной полярности стержня  $650 \text{ кВ} \cdot \text{мкс/м}$ , при отрицательной –  $400 \text{ кВ} \cdot \text{мкс/м}$ . Для промежутков стержень – заземленный стержень  $A/L$  равны при положительной полярности незаземленного стержня  $620 \text{ кВ} \cdot \text{мкс/м}$ , при отрицательной –  $590 \text{ кВ} \cdot \text{мкс/м}$ .



**Рисунок 2.10.** Определение параметров аperiodического коммутационного импульса (слева):  $t_n$  – время нарастания напряжения;  $t_u$  – продолжительность импульса, и средние разрядные напряжения воздушных промежутков положительный стержень-плоскость (справа) в зависимости от среднего времени разряда (косоугольные импульсы).



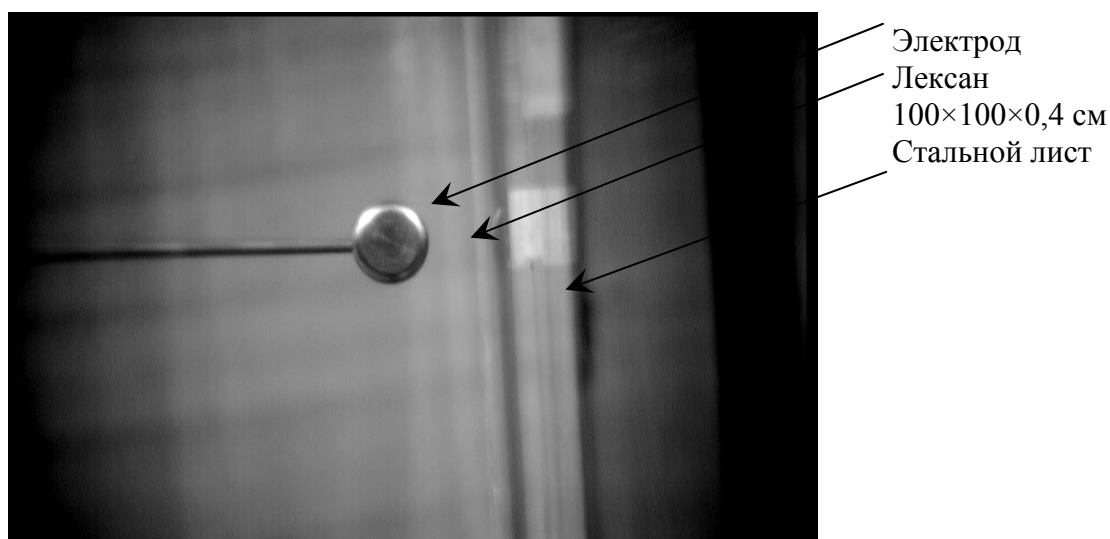
Помимо грозовых импульсов в электроэнергетике используются импульсы, имитирующие коммутационные перенапряжения. Определение параметров апериодического коммутационного импульса показано на рис.2.10.

### **3. Описание экспериментальной установки**

Установка предназначена для исследования влияния поверхностного заряда на импульсный высоковольтный пробой газовой изоляции при наличии барьеров.

Экспериментальная установка состоит из высоковольтного импульсного генератора типа ГИН-500, испытательного стенда, видеокамеры с компьютером и измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1.

Импульсное высокое напряжение на электрод (рис.3.1) подается от генератора ГИН-500, поверхностный заряд на барьере из лексана исследуется при помощи измерителя ИПЭП-1.



*Рисунок 3.1. Электрод для исследования барьерной изоляции*

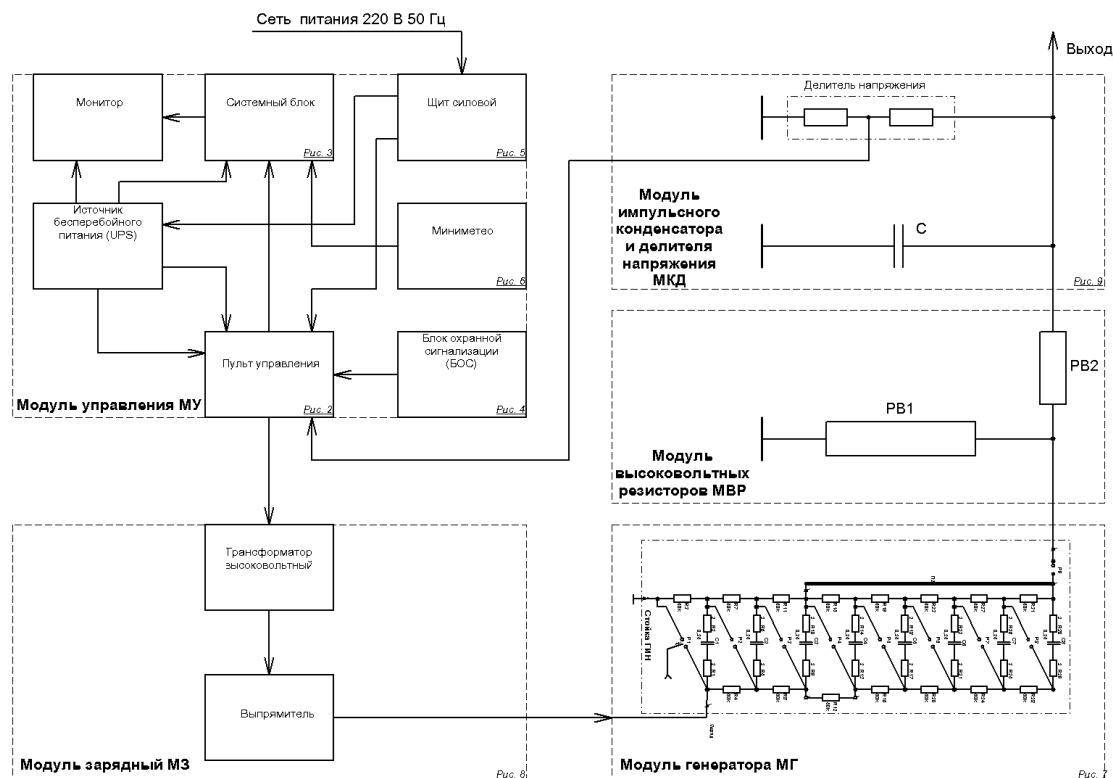
Расстояние между электродом и заземлённой плоскостью – 40 мм, лист барьерной изоляции, выполненной из лексана, расположен посередине межэлектродного промежутка

#### **Описание составных частей установки**

##### **Высоковольтный импульсный генератор типа ГИН-500**

В основу конструкции ГИН-500 положен принцип генерирования униполярного импульса напряжения путем последовательного соединения заряженных конденсаторов с помощью управляемых воздушных разрядников. Установка имеет модульную конструкцию (рис.3.2). В состав

модуля управления входит персональный компьютер со встроенным аналогово-цифровым преобразователем и устройством гальванической развязки сигналов управления, а также вспомогательная аппаратура контроля параметров окружающей среды и системы безопасности.



**Рисунок 3.2.** Структурная схема испытательной установки ГИН-500.

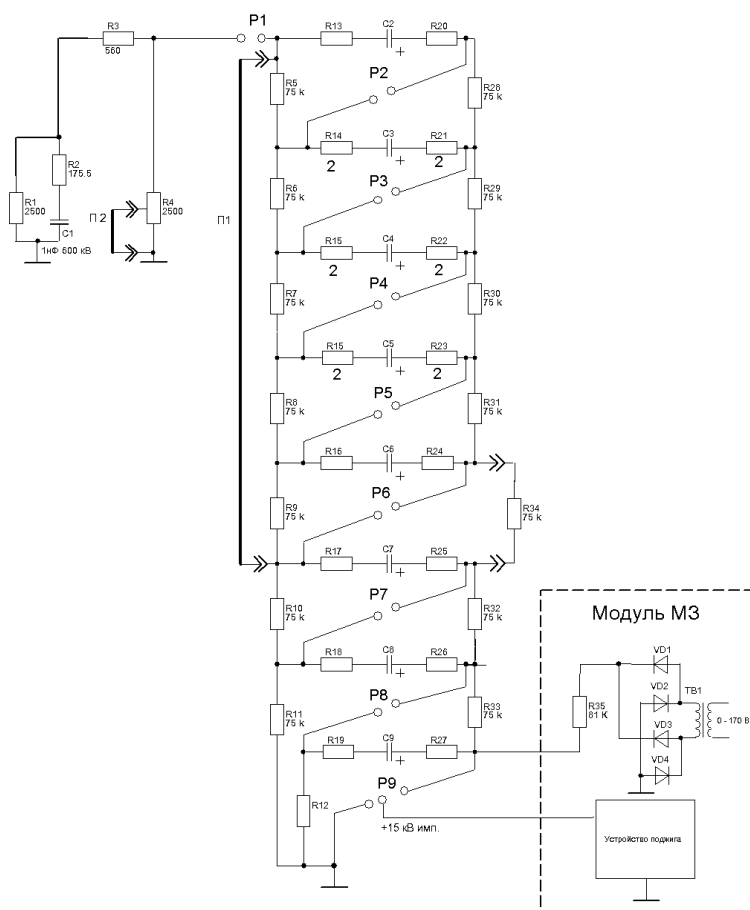
Установка обеспечивает:

- формирование *стандартных грозовых импульсов напряжения* (СГИН) с длительностью фронта  $1,2 \text{ мкс} \pm 30 \%$  и длительностью  $50 \text{ мкс} \pm 20 \%$  (ГОСТ 1516.2-97) в двух поддиапазонах:
  - 1 поддиапазон: от 50 до 175 кВ;
  - 2 поддиапазон: от 175 до 500 кВ;
- автоматическую смену полярности и установку разрядного промежутка между воздушными разрядниками генератора, соответствующего уровню зарядного напряжения импульсных конденсаторов генератора;
- измерение параметров окружающей среды (значений температуры, давления и влажности воздуха), при воздействии которых проводятся испытания;
- автоматическую коррекцию амплитуды СГИН в активированном режиме учета влияния фактических параметров окружающей среды;
- измерение амплитуды и временных параметров СГИН, а также амплитуды напряжения пробоя изоляции испытуемого объекта;

- выполнение заданного количества прикладываемых СГИН в одной полярности с заданной периодичностью воздействий в автоматическом режиме;
- возможность сохранения массива данных (полученных результатов) в формате \*.txt с возможностью конвертирования в *Matlab* для последующей обработки;
- формирование сигнала синхронизации для внешнего устройства, например для включения устройства видеозаписи;
- использование в учебном процессе в качестве стендового оборудования.
- безопасность персонала при эксплуатации, ремонте и техническом обслуживании установки (при условии выполнения требований по эксплуатации и обслуживанию).

### Модуль генератора

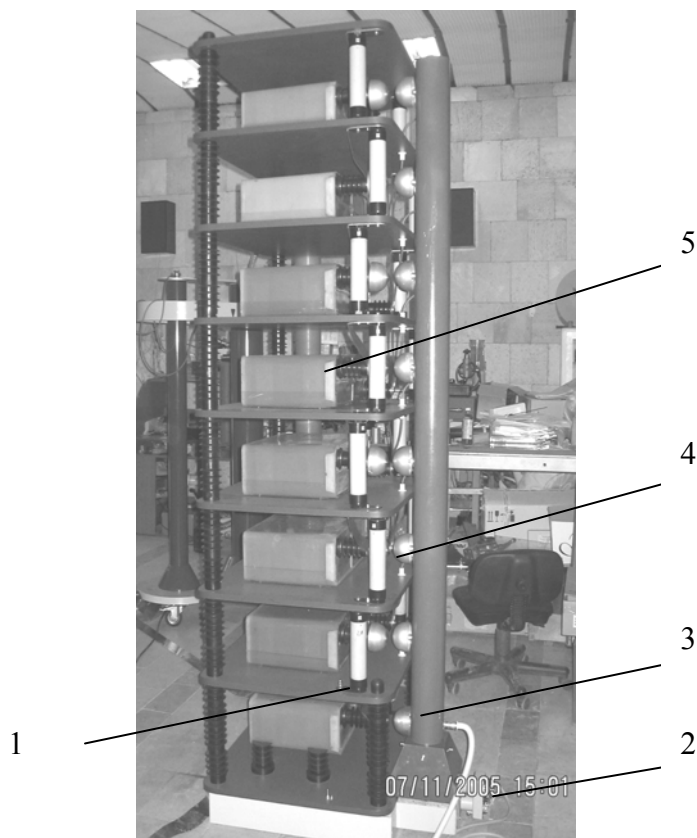
Модуль генератора (МГ) ГИН-500 предназначен для формирования импульса напряжения с коротким фронтом (менее 600 нс).



**Рисунок 3.3.** Схема электрическая генератора импульсного напряжения

Электрическое соединение импульсных конденсаторов выполнено по схеме Маркса. В расположенных друг над другом ступенях МГ установлены импульсные конденсаторы, поджигающие разрядники, зарядные и разрядные резисторы. Нижний воздушный разрядник имеет электрод поджига для запуска разряда, верхние разрядники – пассивные, включаются при возникновении перенапряжений между ступенями ГИН после запуска. На нижней платформе генератора установлены электромеханический привод перемещения разрядников и высоковольтный резистор, формирующий время полуспада грозового импульса напряжения. Электрическая схема генератора, поясняющая принцип действия схемы Маркса, представлена на рисунке (рис.3.3).

Напряжение для заряда конденсаторов (5, рис.3.4) ГИН поступает от модуля зарядного (МЗ) к нижнему контакту балластного жидкостного резистора РБ-80 (1, рис.3.4). Поджиг (запуск) разряда обеспечивается управляемым воздушным разрядником первой ступени (3, рис.3.4). Разрядник соединен высоковольтным кабелем с источником импульсного напряжения (15 кВ), расположенным в модуле МЗ. Все последующие ступени генератора имеют пассивные разрядники, которые включаются при перенапряжении после срабатывания разрядника первой ступени. Расстояние между разрядниками всех ступеней изменяется автоматически в зависимости от уровня напряжения заряда импульсных конденсаторов.



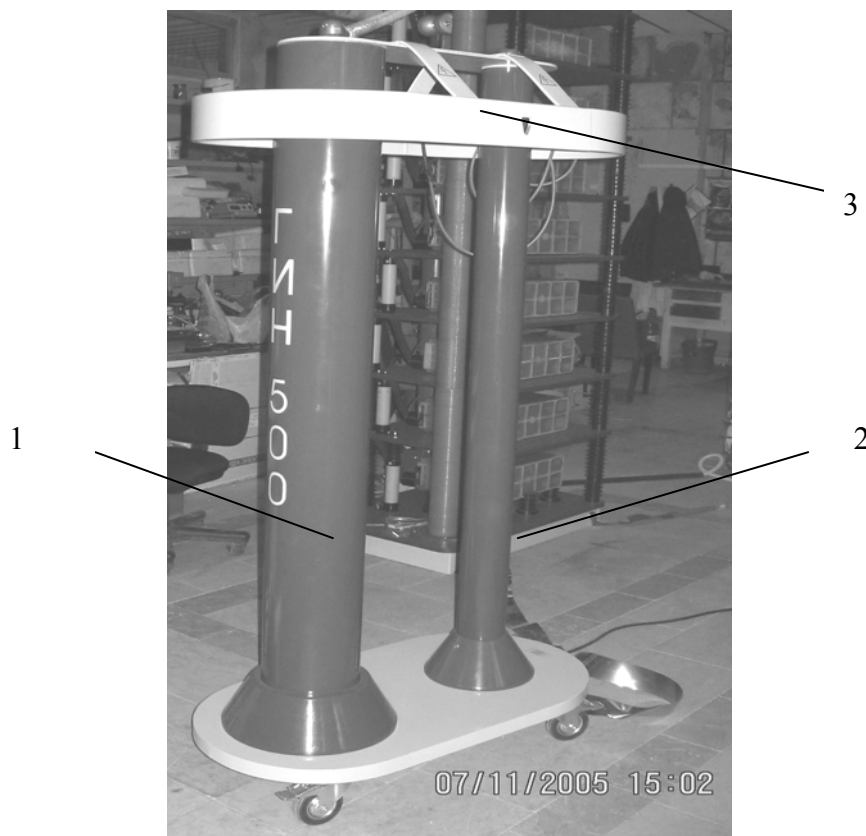
**Рисунок 3.4.** Внешний вид стойки модуля генератора (МГ) импульсного напряжения

## Модуль МКД

В модуле импульсного конденсатора и делителя напряжения (МКД) на общей подвижной платформе установлены импульсный конденсатор, формирующий длительность фронта СГИН (1, рис.3.5), и резистивный делитель импульсного напряжения (2, рис.3.5), входящий в состав измерительного канала СГИН.

Конденсатор соединен с экраном и делителем напряжения через демпфирующий резистор сопротивлением 150 Ом для гашения паразитных колебаний напряжения на фронте СГИН.

Высоковольтный делитель импульсного напряжения состоит из двух параллельно соединенных проволочных резисторов, каждый виток которых намотан встречно друг другу. Сопротивление верхнего плеча делителя составляет 12,6 кОм. Нижнее 50-омное плечо делителя имеет коаксиальную конструкцию. Резисторы делителя размещены внутри изолирующей трубы, установленной на платформе. Конструкция внешних оболочек конденсатора и делителя (изолирующих труб  $\varnothing 200$  мм и  $\varnothing 160$  мм соответственно). Высокочастотный разъем для подключения делителя импульсного напряжения к линии связи расположен под платформой.



**Рисунок 3.5.** Модуль импульсного конденсатора и делителя напряжения МКД

### Модуль зарядный (МЗ)

Модуль зарядный МЗ представляет собой регулируемый преобразователь напряжения сети в постоянное напряжение с реверсируемой полярностью. В состав модуля входят: высоковольтный трансформатор (1, рис.3.6), реверсор полярности напряжения (2, рис.3.6), двухполупериодный выпрямитель (3, рис.3.6), источник напряжения для поджига воздушного промежутка первой пары управляемых разрядников стойки ГИН, а также автоматическое устройство заземления при отключении питания МЗ (5, рис.3.6). Высоковольтный резистивный делитель напряжения на выходе МЗ (4, рис.3.6) расположен на боковой панели. Подвижная платформа МЗ частично ограждена прозрачными изолирующими панелями.



*Рисунок 3.6. Модуль зарядный МЗ*

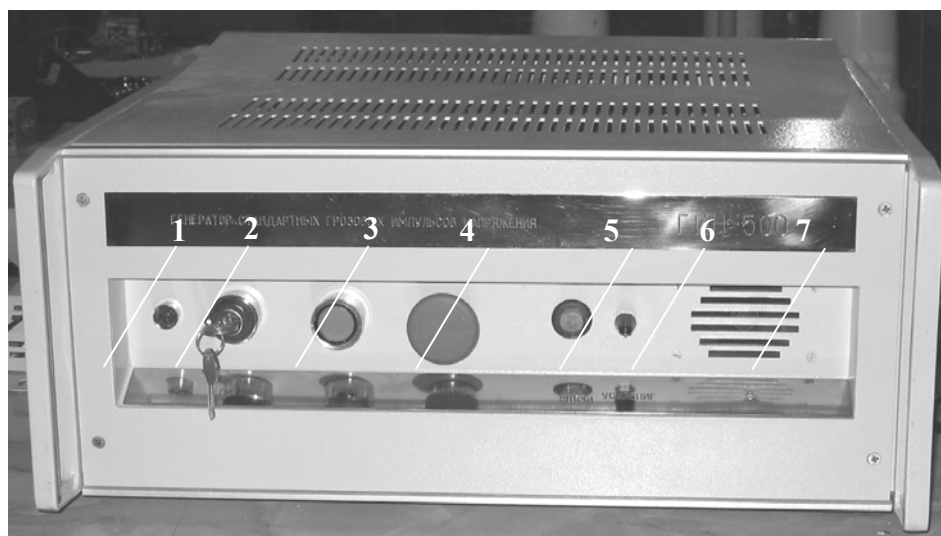
### Модуль управления

Модуль управления (МУ) состоит из отдельных блоков: пульта управления, щита питания, охранной сигнализации, измерения параметров окружающей среды, персонального компьютера с модернизированным системным блоком.

Внешний вид лицевой панели пульта управления (ПУ) установкой представлен на рисунке (рис.3.7). В состав ПУ входят (обозначены на рисунке цифрами):

1. индикатор включения дежурного питания установки;

2. ключ включения дежурного питания;
3. кнопка включения силового питания установки "ПУСК";
4. кнопка выключения силового питания установки "СТОП"
5. переключатель режима работы переговорного устройства (ПУ) "ПРИЕМ/ПЕРЕДАЧА";
6. регулятор громкости звука;
7. громкоговоритель.



*Рисунок 3.7. Пульт управления установкой с переговорным устройством*

### **Блок БОС-ПР**

Внешний вид блока охранной сигнализации и проверки разрядника (БОС-ПР) представлен на рисунке (рис.3.8).



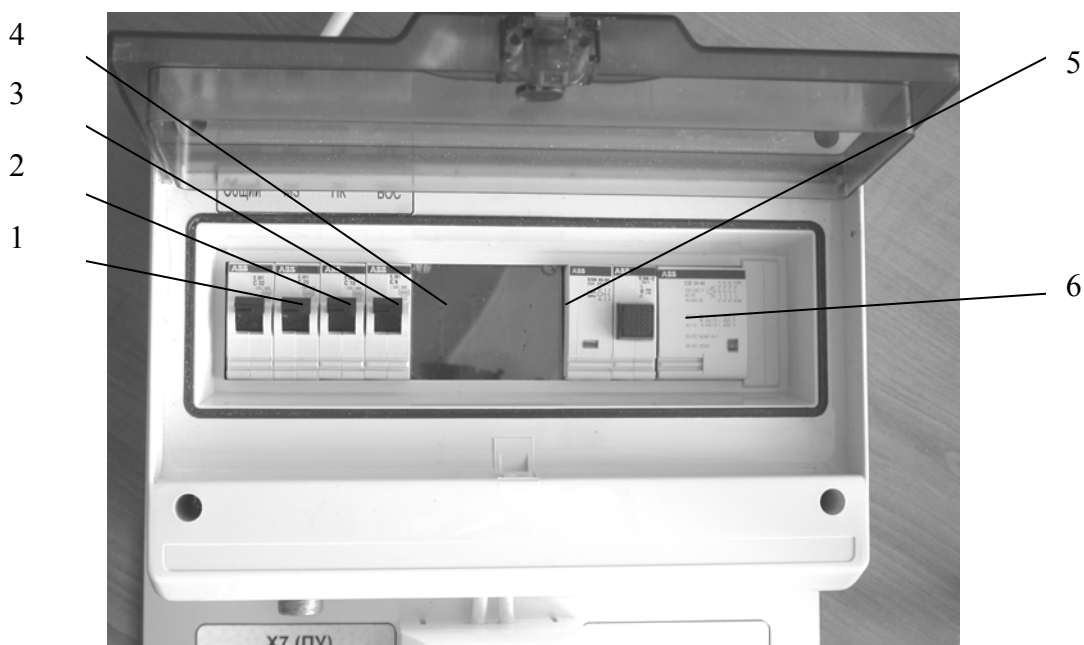
*Рисунок 3.8. Блок охранной сигнализации и проверки штанги заземления БОС-ПР*

На рисунке (рис.3.8) цифрами обозначено:

1. лампа включения охранной сигнализации;
2. контакт для касания штанги заземления при ее проверке;
3. звонок.

### Силовой щит

Силовой щит электропитания ЩС-1 предназначен для коммутации цепей питания установки в дежурном режиме, подключения модуля МЗ при работе генератора, а также для отключения питания МЗ при размыкании цепей блокировки. Внешний вид щита представлен на рисунке (рис.3.9).



*Рисунок 3.9. Щит электропитания установки (ЩС-1)*

На рисунке цифрами обозначены:

1. вводной автомат питания установки;
2. автомат включения силового питания установки;
3. автомат дежурного питания модуля управления;
4. автомат питания блока охранной сигнализации;
5. индикатор "HV" включения модуля зарядного напряжения;
6. индикатор включения блокировки (открыта дверь в высоковольтной бокс).

### Блок Миниметео

Блок "МИНИМЕТЕО-02" предназначен для измерений атмосферного давления, относительной влажности и температуры воздуха в помещении высоковольтного бокса установки ГИН-500.



### **Видеорегистрирующая аппаратура.**

Видеосъёмка проводится для регистрации предразрядных процессов, стримерной незавершенной формы разряда и искрового пробоя. Видеосъёмка производится видеокамерой VSC-746 (СПб) чувствительностью 0,004 Лк ( $f = 1,4$ ) в темноте. Размер изображения 720×576 пикс. Видеоизображение регистрируется в компьютер при помощи программы *Ulead DVD movie factory*.

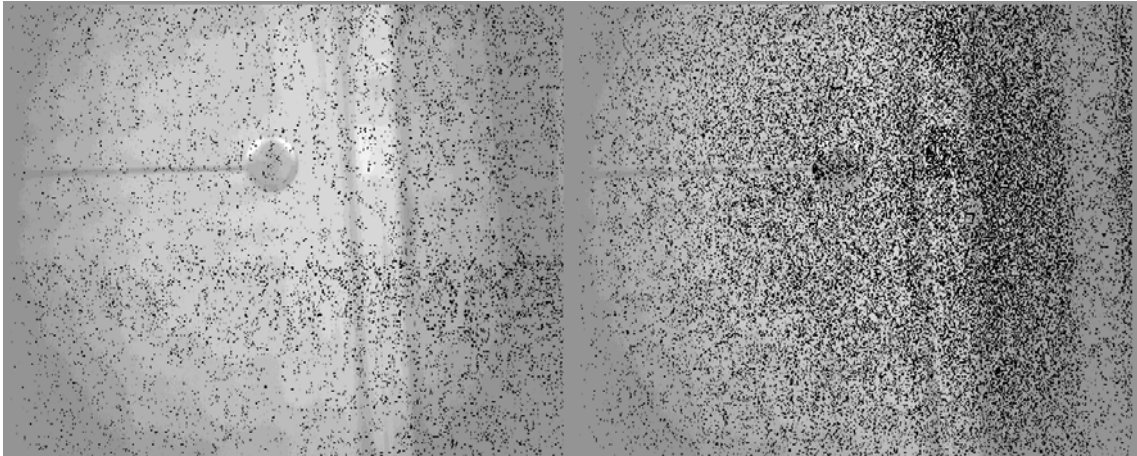
Видеозапись рекомендуется включать сразу после включения ГИН-500 на подачу импульса и остановить съёмку сразу после разряда. Разряд хорошо слышен через динамик МУ и по характерным звукам реле в системах коммутации сигналов.

Обработка видеоизображения производится при помощи вспомогательных программ, в частности *VirtualDub-MPEG2 1.5.10*. При обработке видеоизображения производятся следующие преобразования, которые в программе *VirtualDub-MPEG2 1.5.10* входят в список фильтров:

1. инверсия исходного изображения, т.к. при незначительном изменении яркости легче заметить тёмные пятна на светлом фоне, чем светлые на тёмном,
2. наложение изображения электрода (рис.3.1) с непрозрачностью 3÷10 % на каждый кадр видеозаписи,
3. разложение каждого кадра на полукадры,
4. изменение размера изображения по вертикали в 2 раза, для получения исходного размера изображения, т.к. разложение на полукадры производится удалением «лишних» рядов исходного изображения,
5. коррекция уровней яркости для выделения наблюдаемых явлений, которую стоит производить для каждого кадра.

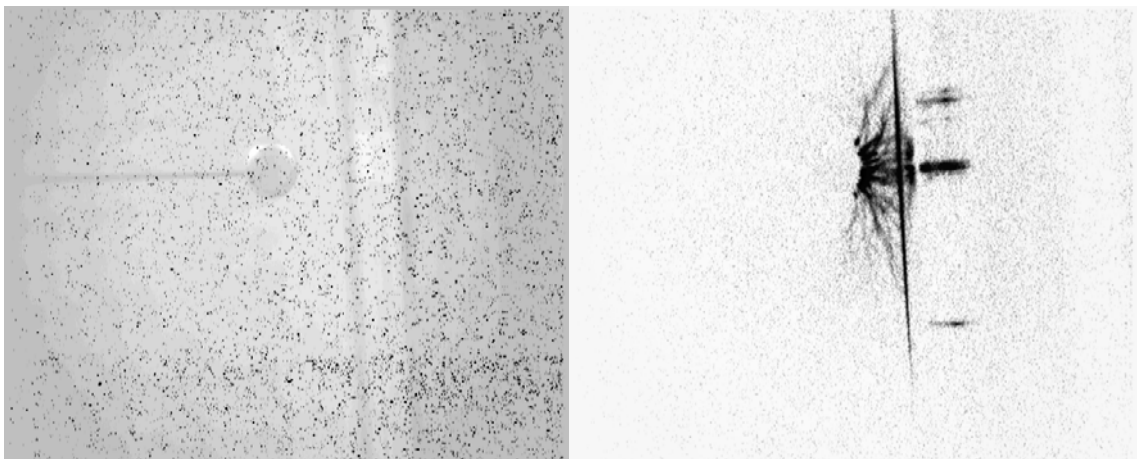
Длительность одного полукадра 0,02 сек, а целого кадра – 0,04 сек, т.к. видеокамера работает с частотой 25 кадров в сек.

На рисунке (рис.3.10) представлены примеры обработки кадров видеоряда, соответствующих моменту подачи импульса напряжения.

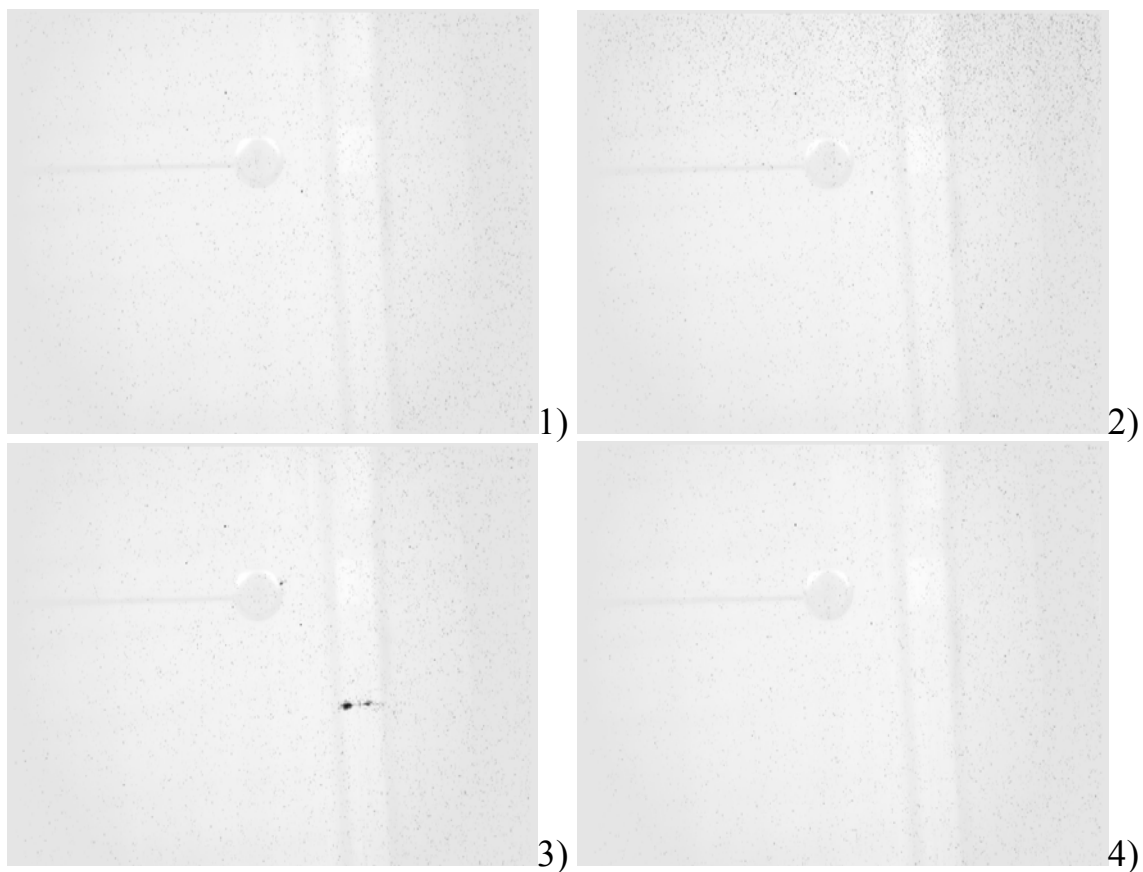


**Рисунок 3.10.** Два полукадра, полученные после обработки кадра видеоизображения момента подачи на электрод грозового импульса  $+70$  кВ.

Последовательность полукадров (рис.3.10) при разряде без электрического пробоя межэлектродного промежутка. На первом полукадре наблюдается небольшое потемнение, на следующем полукадре засветка больше. Так выглядят почти все кадры с разрядом без пробоя. Но есть исключения (рис.3.11–3.14)!



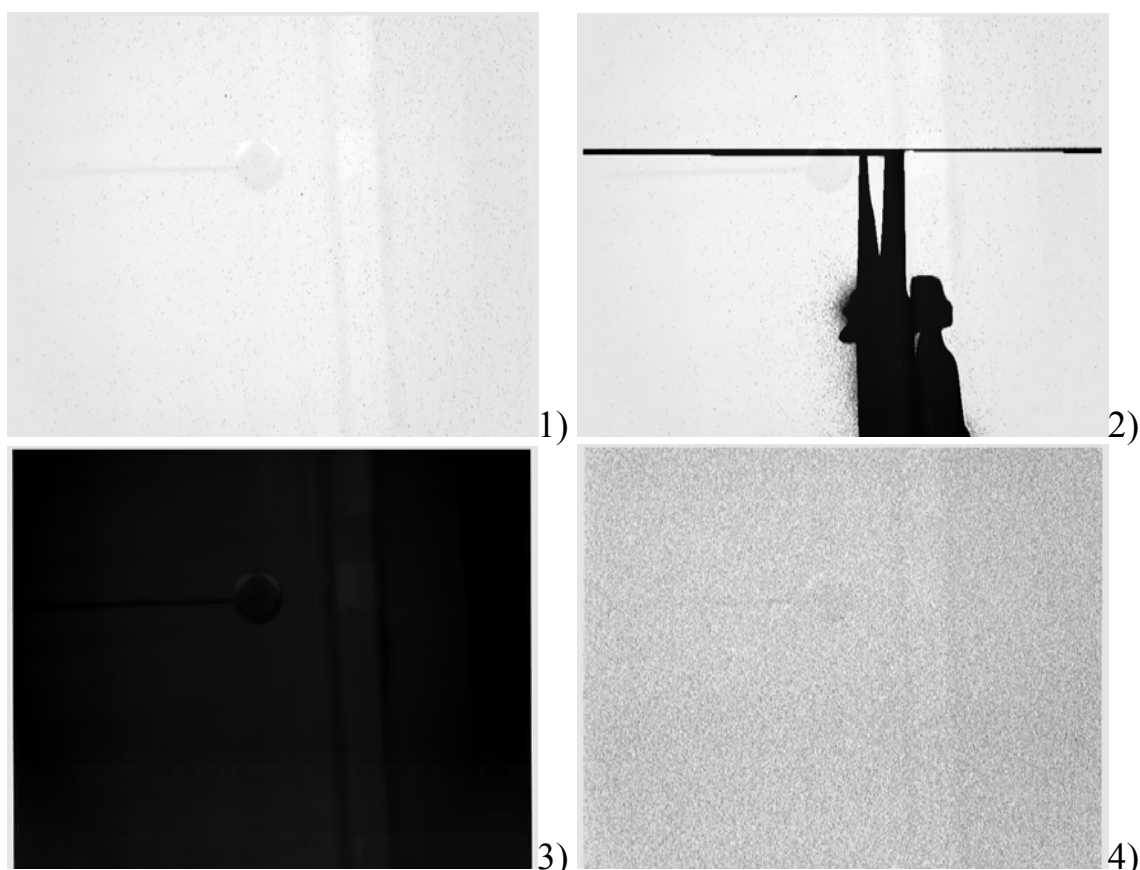
**Рисунок 3.11.** Видеокадр стримерного незавершенного разряда при подаче импульса  $-70$  кВ. Два последовательных полукадра с разными уровнями яркости



**Рисунок 3.12.** Последовательность четырех полукадров при подаче грозового импульса: 1 – вид установки до разряда, 2 – полукадр перед разрядом, 3 – разряд (75 кВ) без пробоя. Виден канал от лексана до стального листа и светлое пятно на электроде. 4 – вид установки после разряда.



**Рисунок 3.13.** Два полукадра: до незавершенного разряда и стримерный незавершенный разряд без искрового пробоя (+80 кВ).



**Рисунок 3.14.** Последовательность полукадров (равные уровни яркости) при завершеном разряде с искровым пробоем: 1 – полукадр до разряда, 2 – разряд с пробоем, 3 – засвеченный (негатив) полукадр в момент разряда с пробоем, 4 – камера «возвращается» к исходным параметрам съемки (всего 5 кадров)

### **Исследование поверхностного заряда на барьерной изоляции после воздействия на нее предразрядных процессов.**

#### **Измеритель параметров электростатического поля ИПЭП-1**

Исследование распределения поверхностного заряда проводится при помощи измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1.

Измеритель предназначен для бесконтактного измерения потенциала электростатически заряженных объектов, напряженности электростатического поля вблизи заряженных плоских поверхностей или поверхностной плотности электрических зарядов.

Измеритель обеспечивает измерение потенциала электростатически заряженных объектов в диапазоне от 0,02 до 10 кВ, с конечными значениями диапазонов  $U_n - 2, 10$  кВ при расстоянии до объекта 2 см, и в диапазоне от 0,1 до 5 кВ, с конечными значениями диапазонов  $U_n - 2, 20, 50$  кВ при расстоянии до объекта 10 см. Формат индикации 3 1/2 разряда.

Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения потенциала ( $\delta$ ), в процентах, равны:

$$\begin{aligned} &\pm [5 + 0,2 \cdot (U_n/U_x - 1)] - \text{при расстоянии до объекта } (2 \pm 0,03) \text{ см,} \\ &\pm [10 + 0,5 \cdot (U_n/U_x - 1)] - \text{при расстоянии до объекта } (10 \pm 0,05) \text{ см,} \end{aligned}$$

где  $U_n$  – конечное значение диапазона [кВ];  $U_x$  – измеренное значение [кВ].

Измеритель обеспечивает измерение напряженности электростатического поля в диапазоне от 2 до 1000 кВ/м с конечными значениями диапазонов  $E_n$  – 200, 1000 кВ/м. Формат индикации 3 1/2 разряда.

Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения напряженности электростатического поля, в процентах, равны:

$$\pm [5 + 0,2 \cdot (E_n/E_x - 1)],$$

где  $E_n$  – конечное значение диапазона [кВ/м],  $E_x$  – измеренное значение [кВ/м].

Измеритель обеспечивает измерение поверхностной плотности электрических зарядов в диапазоне от 0,02 до 10 мкКл/м<sup>2</sup> (от  $2 \cdot 10^{-8}$  до  $1 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>) с конечными значениями диапазонов  $\sigma_n$  – 2, 10 мкКл/м<sup>2</sup>.

Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения поверхностной плотности электрических зарядов, в процентах, равны:

$$\pm [5 + 0,2 (\sigma_n/\sigma_x - 1)],$$

где  $\sigma_n$  – конечное значение диапазона [мкКл/м<sup>2</sup>],  $\sigma_x$  – измеренное значение [мкКл/м<sup>2</sup>].

Пределы допускаемой дополнительной погрешности измерения, при изменении температуры окружающего воздуха на каждые 10°C от нормальной в интервале рабочих температур, не превышают пределов основной погрешности для каждого вида измерений.

Измеритель обеспечивает контроль расстояния до измеряемого объекта с помощью лазерного указателя при двух фиксированных значениях расстояния ( $2 \pm 0,08$ ) см и ( $10 \pm 0,4$ ) см. Пределы допускаемой дополнительной погрешности измерения, обусловленной погрешностью лазерного указателя, не должны превышать  $\pm 5$  % от измеряемой величины для каждого вида измерений.

Измеритель ИПЭП-1 обеспечивает обмен информацией по последовательному асинхронному интерфейсу типа СТЫК С2 в

соответствии с ГОСТ 18145-81 с использованием цепей 102, 103, 104, 106, 107, 108.2, 109.

Измеритель обеспечивает скорость обмена информацией 4800 бит/с.

### **Принцип действия прибора ИПЭП-1**

Принцип действия измерителя основан на методе периодического экранирования приемного электрода. Для этого используется вращающийся с помощью двигателя заземленный экран (заслонка), который периодически закрывает приемный электрод от электростатического поля. Напряжение на приемном электроде периодически изменяется от нуля, когда электрод закрыт, до значения пропорционального потенциалу данной точки, когда электрод открыт. Структурная схема измерителя представлена на рисунке (рис.3.15).

Переменное напряжение, индицируемое на приемном электроде модулятора, усиливается по мощности электрометрическим усилителем (ЭМУ), в цепь обратной связи которого включен конденсатор. Поскольку конденсатор постоянно заряжается током утечки входной цепи, то значение напряжения на приемном электроде не остается равным нулю, а постоянно изменяется. Поэтому значение  $U$  напряжения, пропорционального потенциалу данной точки определяется из выражения:

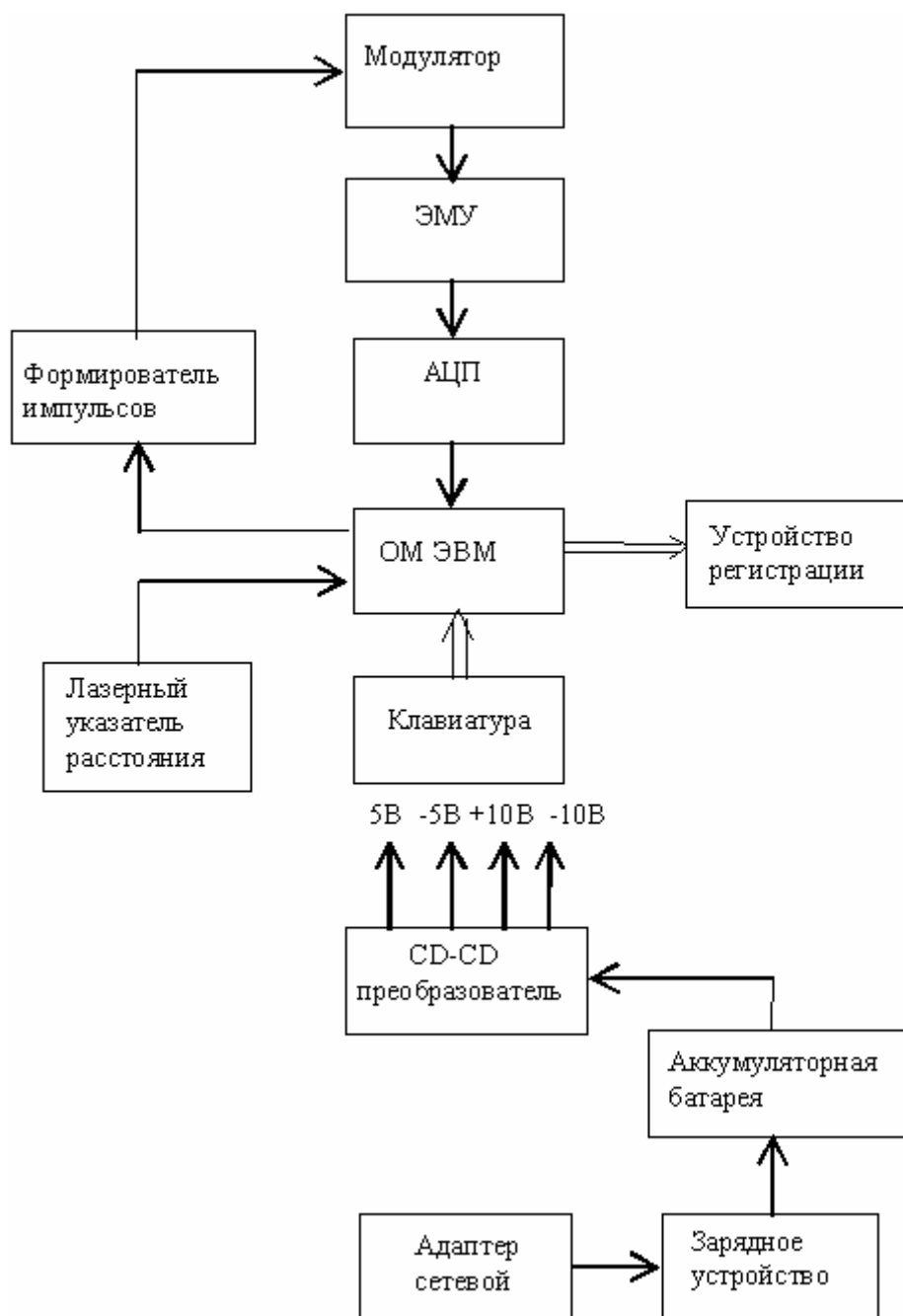
$$U = U_2 - U_1,$$

где  $U_1$  – значение напряжения на электроде при закрытой заслонке,  $U_2$  – значение напряжения на электроде при открытой заслонке.

Значения  $U_1$  и  $U_2$  напряжения снимаемого с выхода ЭМУ измеряются с помощью АЦП. С выхода АЦП сигнал поступает на ОМ ЭВМ, которая осуществляет обработку результатов измерения, умножение на калибровочные коэффициенты, выдачу результатов на индикацию и через последовательный порт на внешнюю ПЭВМ.

Формирователь импульсов формирует импульсы, управляющие шаговым двигателем.

Для удобства проведения измерений в измерителе имеется лазерный указатель расстояния до измеряемого объекта с двумя фиксированными значениями расстояния 2 и 10 см. Измеритель питается от встроенных аккумуляторов. Для питания измерителя от сети служит адаптер сетевой. Преобразователь CD-CD преобразует напряжение, поступающее от адаптера сетевого или от аккумуляторов в питающие напряжения  $\pm 5$  В и  $\pm 10$  В. Зарядное устройство предназначено для зарядки встроенных аккумуляторов.



**Рисунок 3.15.** Структурная схема измерителя

Конструктивно измеритель выполнен в пластмассовом корпусе прямоугольной формы с расширенной верхней частью. К верхней торцевой стенке корпуса крепится датчик, имеющий форму цилиндра. На передней плоскости датчика имеется измерительное окно, закрывающееся поворотной крышкой. Вся схема измерителя выполнена на двух печатных платах, одна из которых находится в датчике. Адаптер сетевой выполнен в отдельном пластмассовом корпусе (рис.3.16).



*Рисунок 3.16. Внешний вид прибора ИПЭП-1.*

Измеритель ИПЭП-1 является высокочувствительным измерительным прибором. Во избежание выхода его из строя, необходимо выполнять следующие рекомендации:

- в нерабочем состоянии измерительное окно датчика должно быть закрыто поворотной крышкой (буква “З” на поворотной крышке находится напротив точки расположенной на корпусе датчика), во избежание загрязнения или повреждения приемного электрода и экранирующей заслонки;
- во время работы с измерителем принимать меры для предотвращения повреждения приемного электрода и экранирующей заслонки через измерительное окно острыми предметами;

Питание измерителя может осуществляться как от сети 220 В с помощью сетевого адаптера, так и от встроенных аккумуляторов.

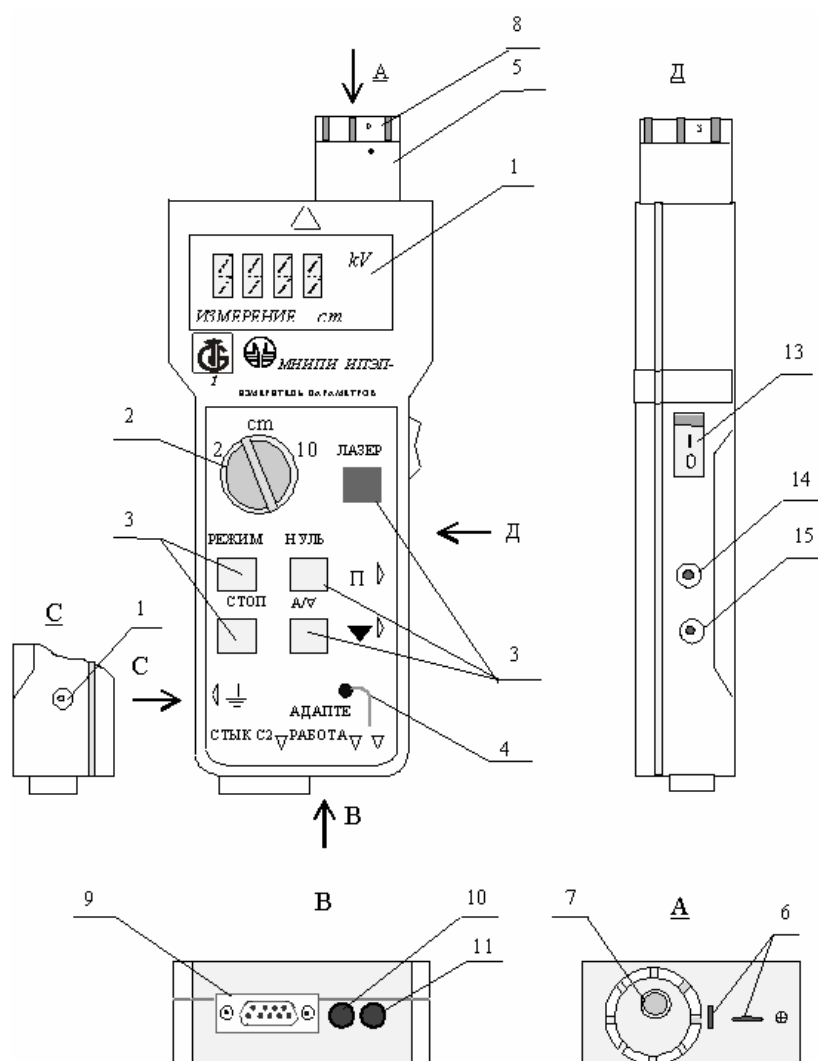
### **Органы управления и подключения**

Органы управления и подключения указаны на рисунке (рис.3.17). На передней панели измерителя расположены:

- информационное жидкокристаллическое табло (1) для отображения измеряемой величины и вспомогательной информации;
- ручка “см” (2);
- клавиатура, состоящая из 5 кнопок (3);
- светодиод “ЗАРЯД” (4).



На передней панели нанесены также обозначения органов подключения и управления, которые фактически расположены на боковой и нижней стенке измерителя.



**Рисунок 3.17.** Схема расположения органов управления и подключения измерителя электростатического поля ИПЭП-1

На верхней стенке измерителя закреплен датчик (5) и имеются два отверстия (6) для выхода лучей лазерного указателя расстояния до измеряемого объекта. На передней плоскости датчика имеется измерительное окно (7), которое закрывается поворотной крышкой (8).

На нижней стенке измерителя расположены:

- розетка “СТЫК С2” (9);
- гнездо “РАБОТА” (10);
- гнездо “ЗАРЯД” (11).

На левой боковой стенке измерителя расположено гнездо “ $\perp$ ” (12).


На правой боковой стенке измерителя расположены:

- выключатель “I-O” (13);

- гнездо “П” (14);
- отверстие “▼” (15).

Назначение органов управления и подключения и наличие их в измерителе в зависимости от варианта исполнения приведено в таблице 3.1

Таблица 3.1

Обозначение	Назначение
Ручка “см”	Переключение указателя расстояния до измеряемого объекта
Кнопка “ЛАЗЕР”	Включение лазерного указателя расстояния
Кнопка “РЕЖИМ”	Включение необходимой функции измерения
Кнопка “НУЛЬ”	Обнуление показаний
Кнопка “СТОП”	Запоминание на индикаторном табло последнего результата измерения
Кнопка “ A/∇ “	Поворот информации на индикаторном табло на 180°
Светодиод “ЗАРЯД”	Сигнализация о включенном режиме заряда аккумуляторов
Розетка “СТЫК С2”	Для обеспечения обмена информацией по последовательному интерфейсу типа СТЫК С2
Гнездо “РАБОТА”	Для подключения адаптера сетевого при проведении измерений
Гнездо “ЗАРЯД”	Для подключения адаптера сетевого при заряде аккумуляторов
Выключатель “I-O”	Для включения измерителя
Гнездо “П”	Для подачи постоянного напряжения при проверке измерителя косвенным методом
Отверстие “▼”	Для включения/выключения режима калибровки
Гнездо “  ”	Для заземления прибора при измерении

### Подготовка к проведению измерений

При работе от питающей сети необходимо адаптер сетевого подключить к гнезду “РАБОТА” измерителя. Подключить вилку адаптера сетевого к питающей сети.

Включить измеритель с помощью выключателя “I-O” , после чего на табло высветится информация “0.000 kV”, слово “ИЗМЕРЕНИЕ” и установленное ручкой “см” расстояние до объекта “2 см” или “10 см”.

Если показание на индикаторном табло превышает  $\pm 2$  ед.мл.разряда (измерительное окно датчика закрыто поворотной крышкой), нажать кнопку “НУЛЬ”.

Открыть измерительное окно датчика, установив поворотную крышку так, чтобы буква “О” на ней совпала с точкой на корпусе датчика. Измеритель готов к проведению измерений. Для обеспечения

метрологических характеристик измерителя необходимо прогреть его в течение 5 мин.

Если предполагается работа от встроенных аккумуляторов, необходимо предварительно их зарядить. Измеритель обеспечивает быстрый заряд аккумуляторов с автоматическим отключением по его окончании. Время заряда полностью разряженной батареи составляет  $(4,5 \pm 0,5)$  ч. Этого достаточно для работы измерителя в течении 8 ч.

Для заряда аккумуляторов необходимо: адаптер сетевой подключить к гнезду “ЗАРЯД” измерителя; подключить вилку адаптера сетевого к питающей сети (выключатель “I-O” должен быть выключен), после чего загорится светодиод “ЗАРЯД”. По окончании заряда светодиод “ЗАРЯД” погаснет.

Адаптер сетевой отключить от сети и от измерителя.

При работе от встроенных аккумуляторов измеритель рекомендуется заземлять. Для этого, необходимо гнездо “ $\perp$ ” измерителя с помощью шнура (3000 мм), имеющегося в комплекте измерителя, соединить с любым заземленным предметом или оператор свободной рукой должен касаться заземленной поверхности для снятия заряда.

## **Проведение измерений**

С помощью кнопки “РЕЖИМ” установить необходимую функцию измерения. Включенная функция измерения в измерителе ИПЭП-1 определяется по высвеченным на индикаторном табло единицам измерения:

- kV – измерение потенциала электростатически заряженных объектов;
- kV/m – измерение напряженности электростатического поля;
- $\mu\text{C}/\text{m}^2$  – измерение поверхностной плотности электрических зарядов.

При измерении измеритель необходимо расположить на выбранном расстоянии от измеряемой поверхности таким образом, чтобы передняя плоскость датчика измерителя была параллельна измеряемой поверхности. Измерение потенциала проводят при расстоянии от передней плоскости датчика измерителя до измеряемой поверхности 2 или 10 см. Точность измерения находится в прямой зависимости от точности установки расстояния. Так, например, ошибка в установке расстояния на 5 % приводит к дополнительной погрешности измерения равной 5 %.

При ручном измерении расстояние до объекта необходимо контролировать с помощью лазерного указателя. Для этого ручку “cm” установить в положение, соответствующее выбранному расстоянию. Измеритель поднести к измеряемой поверхности, нажать кнопку “ЛАЗЕР” и, перемещая измеритель вдоль оси, перпендикулярной к измеряемой поверхности добиться, чтобы светящаяся риска на этой поверхности пересекала светящийся круг точно по центру. Считать показания.

В случае неудобного расположения измеряемого объекта, затрудняющего считывание показаний, после измерения рекомендуется нажать кнопку “СТОП”. Это действие зафиксирует на индикаторном табло последнее значение измеряемой величины и позволит оператору переместить измеритель в любое место, где его можно считать или записать. В этом положении слово «ИЗМЕРЕНИЕ» на табло измерителя не высвечиваются. Повторным нажатием на кнопку “СТОП” вернуть измеритель в режим измерения, при этом слово «ИЗМЕРЕНИЕ» высветятся.

Измерение напряженности электростатического поля и поверхностной плотности электрических зарядов проводят на расстоянии до измеряемого объекта, указанном в методических указаниях по измерению этих параметров для конкретных объектов или материалов. Если измерение проводится на расстояниях 2 или 10 см от измеряемого объекта, то расстояние можно контролировать с помощью имеющегося в измерителе лазерного указателя расстояния. Если измерение проводится при других расстояниях до объекта, то его необходимо контролировать с помощью любых измерительных инструментов, обеспечивающих необходимую точность.

Для удобства проведения исследования материалов на измерительных столах в комплекте измерителя имеется насадка, которая удерживает измеритель в вертикальном положении на расстоянии 2 см от исследуемой поверхности, что исключает необходимость удерживать измеритель в руках и контролировать расстояние до измеряемой поверхности. Для проведения измерений на измерительном столе необходимо насадку надеть на датчик измерителя до упора. Поскольку при таких измерениях информация на индикаторном табло оказывается перевернутой, для удобства считывания в измерителе ИПЭП-1 имеется возможность, нажав кнопку “ A/√ ”, повернуть информацию на индикаторном табло на 180°.

Время начала измерения до считывания показания не должно быть менее времени установления показаний измерителя. В обычном режиме время установления показаний измерителя составляет 2,5 с, а с включенным фильтром – 5 с. Для включения фильтра необходимо нажать кнопку “СТОП” и удерживать ее в нажатом состоянии до высвечивания на табло символа “⌂”. Выключается фильтр повторным нажатием кнопки “СТОП” с удержанием ее в нажатом состоянии до выключения символа “⌂”.

В связи с тем, что измеритель имеет высокое разрешение по площади измерения (диаметр измерительного окна  $\varnothing$  9 мм), а заряд распределяется неравномерно по поверхности материала, следует иметь ввиду, что при повторных измерениях, проводимых в одной и той же точке, даже небольшое отклонение местоположения измерителя относительно

контролируемой точки может привести к значительному разбросу показаний.

#### **4. Задание на предварительную подготовку**

- Изучить устройство ГИН-500 и приемы работы с ним.
- Изучить устройство ИПЭП-1 и работу по измерению поверхностного заряда
- Изучить приемы видеорегистрации предпробойных процессов.
- Изучить основы техники безопасности при работе с высоким напряжением.

#### **5. Задания на проведение работы**

- Воздействовать на межэлектродный промежуток грозовым импульсом с заданными параметрами.
- Произвести регистрацию параметров импульса и провести видеозапись процессов в межэлектродном промежутке.
- Исследовать распределение поверхностного заряда по поверхности барьерной изоляции.
- Обработать кадры видеорегистрации предразрядных явлений.
- Провести комплексный анализ экспериментального материала и сделать выводы.
- Составить подробный отчет.

#### **6. Порядок проведения экспериментов**

##### ***Подготовка к использованию установки ГИН-500***

1. Проверить наличие установленного на высоковольтный вывод установки стационарного и переносного заземления. Произвести внешний осмотр установки, проверив комплектность и целостность ее составных частей и кабельных соединений, наличие заземления и надежность подключения к нему всех составных частей установки. При обнаружении дефектов или повреждений принять меры к их устранению. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*
2. Подготовить к работе средства измерений, входящие в состав установки, в соответствии с эксплуатационной документацией. Установить необходимую конфигурацию ГИНа (ГИН-200 или ГИН-500), в зависимости от требуемой амплитуды подаваемого импульса. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*
3. Произвести подготовку испытательного объекта (образца барьерной изоляции) к испытаниям. Очистить и обезжирить поверхности, проверить распределение поверхностного заряда перед проведением

испытаний.

4. Проверить правильность и надежность соединений составных частей установки, средств измерений и испытуемого объекта для проведения испытаний. Установить испытательный образец в установке и подключить установку к ГИНу. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*
5. Убрать переносное заземление. Включить блок охранной сигнализации, при этом кратковременно включится звонок, лампа световой сигнализации будет мигать. Закрыть сетчатую дверь зала высоковольтных испытаний, при этом лампа световой сигнализации будет гореть постоянно. При необходимости выключить лампу сигнализации на время проведения испытаний. Закрыть на ключ дверь в помещение для испытаний. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*
6. Подготовить рабочее место оператора. Проверить наличие видимого разрыва цепи питания установки. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*

### **Использование установки ГИН-500**

Для включения установки необходимо выполнить следующие действия (*Все действия выполняются специалистом, имеющим соответствующий допуск*):

- включить вилку "Деж. питание" в розетку "Деж. питание", вилку питания модуля зарядного – в розетку «Заземление»;
- в распределительном щите включить автоматические выключатели;
- в пульте управления вставить ключ в замок выключателя "Дежурный режим" и повернуть его по часовой стрелке, при этом включится индикатор на передней панели;
- нажать кнопку "Пуск", при этом включится зеленая подсветка кнопки;
- включить питание монитора. Загрузить программу управления установкой (Приложение 2).

### **Порядок проведения эксперимента**

1. Собрать испытательную установку: установить необходимый электрод, на который будет подаваться грозовой импульс, выставить необходимое расстояние между электродами, установить в межэлектродном промежутке испытательный образец (образец барьерной изоляции) на заданном расстоянии от электрода. Включить охранную сигнализацию. *Внимание! Любые работы в помещении с высоковольтным блоком производятся только лицами, имеющими соответствующий допуск.*
2. Включить и прогреть контрольно-измерительную аппаратуру: включить ГИН-500 (при включении ГИН-500 напряжение на МЗ не подавать!).

*Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*

3. Включить компьютер с оборудованием для видеорегистрации и запустить программу для записи видеосигнала *Ulead DVD movie factory*, или аналогичную для видеорегистрации процесса разряда на электроде.
4. Настроить видеокамеру: при включённом освещении помещения и максимально открытой диафрагме объектива сфокусировать камеру на электрод под нужным углом обзора. Сделать один кадр при включённом освещении (рис.3.1) для дальнейшего использования при обработке видеозаписей.
5. Проверить, что охранная сигнализация включена, при необходимости отключить сигнальное освещение (нельзя забывать включать сигнальное освещение после проведения экспериментов), закрыть дверь в помещение для его затемнения. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*
6. Включить питание высоковольтного источника: подать напряжение на МЗ. Задать необходимые параметры подаваемых импульсов. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*
7. Подать серию импульсов (например, один импульс) на испытательный образец. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*
8. При подаче команды на выполнение задания необходимо включить запись видеосигнала. После окончания серии импульсов регистрацию видеосигнала необходимо остановить.
9. Остановить ГИН-500: отключить напряжение на МЗ. *Эти действия производятся только специалистом, имеющим соответствующий допуск (Приложение 1).*
10. Вынести барьер из испытательной установки и с помощью измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1 произвести измерение плотности поверхностного заряда (напряжённости поля поверхностного заряда) на образце.
11. Для повторения или проведения новой серии исследований необходимо повторить пункты 2÷9.

## **7. Обработка экспериментальных данных**

### **Результаты экспериментов**

После проведения серии экспериментов будут получены следующие данные:

- Осциллограммы каждого импульса (если включена опция сохранения всех осциллограмм) с его параметрами (длительность фронта, амплитуда импульса, длительность импульса, наличие или отсутствие

разряда, т.е. пробоя межэлектродного промежутка, напряжение пробоя, положение пробоя (на подъеме или на спаде импульса), климатические параметры (атмосферное давление, температура, влажность).

- Видеозапись межэлектродного промежутка в моменты подачи импульса.
- Распределение плотности поверхностного заряда после подачи серии импульсов.

Осциллограммы с параметрами импульсов сохраняются в базе данных программы *HVG\_500\_P*, с помощью которой производится управление ГИН-500.

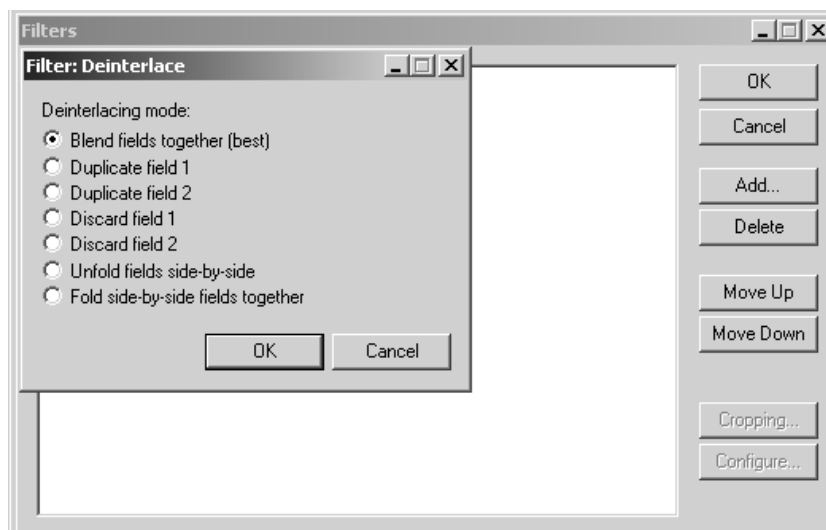
### **Обработка видеозаписи**

Все полученные видеофайлы содержат затемнённые кадры, т.к. съёмка производится в тёмном помещении. На отдельных кадрах (рис.3.10-3.14), соответствующих моменту разряда может содержаться информация о наличии или отсутствии стримерных разрядов на электроде. Для получения этой информации из полученных видеофайлов необходимо провести дополнительную обработку этих видеофайлов.

Обработка видеоизображения производится при помощи вспомогательных программ, в частности *VirtualDub-MPEG2 1.5.10*. При обработке видеоизображения производятся следующие преобразования, которые в программе *VirtualDub-MPEG2 1.5.10* входят в список фильтров (в порядке их применения):

1. инверсия исходного изображения (фильтр *inverse*), т.к. при незначительном изменении яркости легче заметить тёмные пятна на светлом фоне, чем светлые на тёмном,
2. наложение изображения (фильтр *logo*) электрода (рис.3.1) с прозрачностью 3-10% на каждый ряд видеозаписи,
3. разложение каждого кадра на полукадры (фильтр *deinterlace*), удобно использовать параметр *Unfold fields side-by-side* (рис.7.1), который позволяет получать в одном поле оба полукадра (рис.3.10, 3.13).





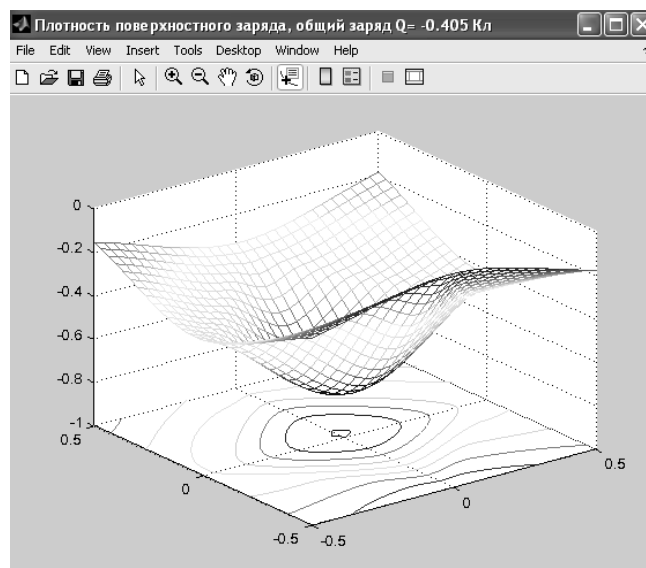
**Рисунок 7.1.** Выбор параметра устранения явления чересстрочной развёртки

4. изменение размера изображения (фильтр *resize*) по вертикали в 2 раза, для получения исходного размера изображения, т.к. разложение на полукадры производится путём удаления «лишних» рядов исходного изображения,
5. коррекция уровней яркости (фильтр *levels*) для выделения наблюдаемых явлений, которую стоит производить для каждого информативного кадра.

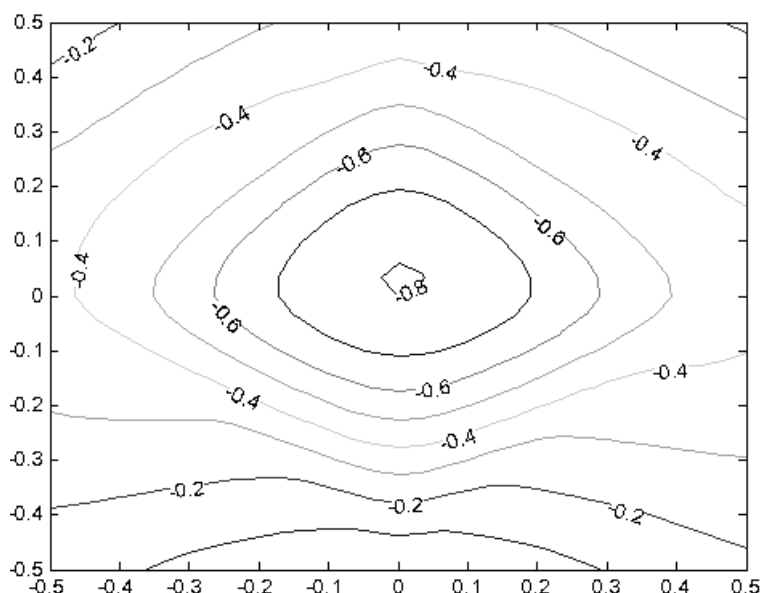
На полученных после обработки кадрах (рис.3.10-3.14) отображены примеры предпробойных явлений: наличие или отсутствие стримеров при подаче грозового импульса.

### **Построение распределения поверхностного заряда по барьеру**

Для построения поверхностного графика распределения заряда по поверхности барьера используется специальная программа **povzar**, реализованная в среде *Matlab*. Программа **povzar** представляет собой функцию, которая интерполирует матрицу значений заряда на равномерную сетку, выводит трёхмерный график интерполированных данных (рис.7.2), находит внутри исследуемой области суммарный поверхностный заряд и выводит контурный график распределения поверхностного заряда (рис.7.3).



**Рисунок 7.2.** Трёхмерный график распределения поверхностного заряда. Суммарный заряд 0,45 усл.ед.



**Рисунок 7.3.** Контурный график распределения поверхностного заряда [усл.ед.].

Для применения этой программы достаточно записать в ряд значения плотности поверхностного заряда в заданных точках. Программа сама записывает матрицу значений и строит необходимые графики.

## 8. Контрольные вопросы:

1. Описать особенности импульсного разряда.
2. Каковы параметры стандартного грозового импульса?
3. Как устроен ГИН-500?
4. Описать программное обеспечение работы ГИН-500 и способы задания параметров грозового импульса.

5. Описать приемы обработки изображений в программе VirtualDub-MPEG2 1.5.10.
6. Описать устройство и принцип работы измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1.
7. Основы техники безопасности при работе с ГИН-500.

### **9. Рекомендуемая литература**

1. И.М. Бортник, И.П. Верещагин и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений. // Энергоатомиздат. Москва. 1993 г.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты, ФМЛ, 2001.
3. И.П. Верещагин. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. // Энергоатомиздат. Москва. 1985г.

### **10. Приложения**

В работе использованы следующие программные продукты:

- *EVSCap*,
- *Ulead DVD Movie Factory*
- *HVG\_500\_P*

## **Правила пользования установкой испытательной импульсным напряжением ГИН-500**

### **Общие положения**

К самостоятельному проведению испытаний на установке испытательной ГИН-500 допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие инструктаж на рабочем месте, прошедшие обучение по вопросам безопасного выполнения работ в электроустановках и проверку знаний, имеющие опыт практической работы на данной установке, полученный в период стажировки в течение 15 рабочих смен и аттестованные по электробезопасности на квалификационную группу не ниже III (для работы с электроустановками выше 1000 В).

Сотрудники, допущенные к самостоятельному проведению испытаний на установке ГИН-500 и ее обслуживанию должны иметь соответствующую выполняемым работам квалификационную группу по электробезопасности, а также:

- знать принцип действия, устройство и компоновку установки ГИН-500;
- знать и уметь применять на практике правила электробезопасности в объеме, относящимся к выполняемой работе;
- знать общие принципы оказания первой помощи и ее приемы применительно к характеру полученного пострадавшим повреждения.

### **Эксплуатационные ограничения**

По условиям безопасности эксплуатация установки недопустима, если:

- неисправна система дверной блокировки и сигнализации, препятствующая доступу персонала на испытательное поле во время работы установки;
- неисправно устройство БОС-ПР для проверки переносного заземления, а также штанга переносного заземления;
- неисправна штанга разрядки импульсных конденсаторов и отключения цепи питания высоковольтного трансформатора модуля зарядного МЗ;
- неисправна кнопка аварийного отключения питания пульта управления.

Конденсация влаги на поверхностях установки во время использования не допускается. Любой возможный конденсат должен быть тщательно высушен перед пуском установки в работу.

### **Требования безопасности**

При подготовке и проведении испытаний необходимо соблюдать общие требования техники безопасности (ГОСТ 12.3.020-80 и ГОСТ

12.2.003-91) и следующие меры предосторожности при работе с установкой:

- установка должна обслуживаться только специально обученным персоналом;
- перед каждым пуском путем визуального контроля убедиться в исправном состоянии установки:
  - проверить наличие, надежность и качество заземления установки и ее составных частей;
  - проверить правильность и надежность электрических соединений для конкретного типа объекта испытания в соответствии с его методикой испытаний;
- при входе в высоковольтную часть установки необходимо оставлять открытой входную дверь, вывесить предупредительный плакат "Не включать! Работают люди" предотвращения включения испытательной установки другими лицами по недосмотру;
- для проверки отсутствия напряжения на электродах конденсаторов в первую очередь наложить переносную штангу заземления на высоковольтный электрод ударного конденсатора;
- запрещается проведение испытаний и других работ при снятых защитных панелях составных частей установки;
- не оставлять включенную установку без наблюдения;
- после окончания испытаний отключить установку от сети.

### **Меры безопасности при обслуживании**

- Ремонт установки допускается производить только силами квалифицированных специалистов, подготовленных для проведения указанных работ.
- Сборку/разборку модулей установки и проверку состояния производить только при полном их отключении от сети электропитания.

### **Порядок технического обслуживания установки**

- Составные части установки не требуют специального технического обслуживания. Рекомендуется периодически осуществлять внешний осмотр состояния их корпусов, производить, при необходимости, подтягивание резьбовых соединений и выполнять измерения сопротивления изоляции соединительных шин и кабелей.
- Каждый раз после окончания работы произвести внешний осмотр установки и убедиться в отсутствии электрических и механических повреждений ее узлов. При обнаружении повреждений произвести необходимые работы по ремонту и восстановлению работоспособности установки.
- Корпуса составных частей установки, кроме обычной чистки, не

требуют специального ухода.

- Не реже одного раза в год необходимо проверять чистоту поверхностей шаровых разрядников модуля ГИН. При необходимости отполировать поверхность полусфер мелкой шкуркой и проверить расстояния между электродами.

### **Требования безопасности во время работы**

- Произвести переключение вводных цепей электропитания установки (вилки кабеля электропитания в распределительном щите) от розетки заземления в розетку электропитания.
- В боксе оператора включить необходимые для работы измерительные приборы и вспомогательное оборудование;
- Включить электропитание главного контактора и контактора нормального режима на пульте управления установки; сотрудник, подключающий УИ к электросети, должен предупредить об этом бригаду словами: «Подаю напряжение».
- Дальнейшие действия по управлению работой установки и программного обеспечения проводить согласно руководству по эксплуатации установкой ГИН-500 ААНЭ.441324.002РЭ-ИЛ.
- При проведении испытаний персонал должен находиться от ограждения помещения на расстоянии не меньше, указанного в таблице:

Напряжение, кВ	Расстояние от людей и применяемых ими инструментов и приспособлений, от временных ограждений, м
110	1,0
150	1,5
220	2,0
330	2,5
500	3,5

- Произвести требуемые воздействия на образец испытаний и измерения, оговоренные в программе испытаний.
- Эксплуатация контрольно-измерительной аппаратуры должна соответствовать требованиям ее эксплуатационной документации.
- Во время испытаний членам бригады запрещается оставлять без присмотра УИ, находящуюся под напряжением.
- При проведении испытаний запрещается превышать предельно - допустимые режимы работы испытательной установки.

### **Требования безопасности по окончании работы**

- Отключить электропитание главного контактора и контактора нормального режима на пульте управления УИ.

- Отпереть дверь, ведущую к испытательным полям.
- Войти в секцию для испытаний импульсным напряжением на испытательной установке ГИН-500 и отключить электропитание охранной сигнализации.
- При помощи блока проверки разрядников проконтролировать исправность переносного заземления. Наложить исправное переносное заземление на высоковольтные токоведущие части установки.
- Убедиться, что токоведущие цепи высоковольтных конденсаторов соединены с подвижным контактом автоматического заземлителя.
- При наличии последовательного соединения конденсаторов в испытательной схеме, необходимо разрядить каждый из этих конденсаторов отдельно.
- Снять с двери секции для испытаний импульсным напряжением на испытательной установке ГИН-500 табличку, предупреждающую об опасности.
- Сообщить бригаде словами: «Напряжение снято».

При условии выполнения вышеуказанных действий раздела разрешается переподсоединять провода в испытательной схеме, отключать испытуемый образец, вести другие работы, связанные с проведением текущих испытаний.

После завершения программы испытаний и окончания работ на электроустановке, а также в случае проведения каких-либо ремонтных работ произвести переключение вводных цепей электропитания установки (вилки кабеля питания) из розетки электропитания в розетку заземления. Запереть двери распределительного щита.

После выполнения этого пункта установка считается недействующей. Закрыть двери секции для испытаний импульсным напряжением на испытательной установке ГИН-500 на замок.

### **Требования безопасности при возникновении аварийных ситуаций**

- При возникновении любых сбоев в работе УИ испытания должны быть немедленно прекращены до выяснения и устранения причин возникновения неисправности.
- При возникновении любой аварийной ситуации, ухудшении самочувствия, немедленно прекратить работу, отключить установку и сообщить о случившемся руководителю работ или начальнику сектора.
- В случае возгорания электрооборудования или пожаре на рабочем месте необходимо немедленно прекратить работу, отключить электропитание (если электрооборудование подключено к электросети), известить администрацию, принять меры по тушению очага пожара, доложить при необходимости на центральную проходную для вызова пожарных.

- При внезапном отключении электроосвещения воспользуйтесь автономным переносным фонарем, который находится в операторской.

### **Опасные и вредные факторы, действующие при эксплуатации установки ГИН-500**

При эксплуатации установки действуют следующие опасные и вредные факторы:

- опасность поражения электрическим током, связанная с необходимостью работы в помещении с особой опасностью;
- мягкое рентгеновское излучение появляется при возникновении разрядов в вакуумной дугогасительной камере;
- при подключении испытательной установки к источнику напряжения промышленной частоты, ее цепи, цепи испытуемого образца, являются источниками электромагнитного поля переменного тока промышленной частоты;
- ультрафиолетовое и инфракрасное излучение сопровождает полные разряды;
- электростатическое поле существует при наличии заряженных элементов испытательной установки (например, высоковольтных конденсаторов) и испытуемого образца;
- появление озона и аэроионизации в воздухе зоны для высоковольтных испытаний при прохождении полных разрядов.

### **Оказание первой доврачебной помощи пострадавшим при несчастных случаях, авариях или ухудшении здоровья.**

#### **Общие требования при оказании первой доврачебной помощи**

При поражении электрическим током необходимо соблюдать следующую последовательность оказания первой помощи:

- устраните воздействие на организм человека повреждающих факторов, т.е. освободите его от действия электрического тока;
- оцените состояние пострадавшего;
- определите характер и тяжесть травмы, создающую наибольшую угрозу для жизни пострадавшего и последовательность мероприятий по его спасению;
- выполните необходимые мероприятия по спасению пострадавшего в порядке срочности (восстановите проходимость дыхательных путей, сделайте массаж сердца, остановите кровотечение и т.п.);
- поддержите основные жизненные функции пострадавшего до прибытия медицинского работника;
- вызовите скорую медицинскую помощь;
- организуйте транспортировку пострадавшего в ближайшее медицинское учреждение.



### **Приемы устранения действия электрического тока в установках с напряжением до 1000 В**

- отключите ту часть УИ, элемента которой касается пострадавший (выключателем, рубильником, снятием предохранителей и т.п.);
- если пострадавший находится на высоте, примите меры, предупреждающие его падение при освобождении от действия электрического тока;
- в условиях недостаточной видимости необходимо воспользоваться источником освещения независимым от наличия напряжения в цепях электропитания УИ;
- освобождайте пострадавшего от тока напряжением до 1000 В палкой, веревкой или другим сухим токонепроводящим предметом (сухой одеждой), перерубанием проводов. Работайте одной рукой, обмотайте руку сухим шарфом, пользуйтесь резиновыми перчатками, ковриками.

### **Приемы устранения действия электрического тока в установках с напряжением свыше 1000 В**

- наденьте перчатки, боты и, действуя штангой или изолирующими клещами, рассчитанными на соответствующее напряжение, отделите пострадавшего от токоведущих частей, находящихся под напряжением выше 1000 В;
- помните об опасности действия напряжения шага если провод лежит на бетонном полу или земле;
- после освобождения пострадавшего от действия тока вынесите его из опасной зоны и окажите первую медицинскую помощь в последовательности указанной в настоящей инструкции.

## **Описание программного обеспечения ГИН-500**

### **Подготовка к работе**

Персональный компьютер (ПК), находящийся в составе установки, на момент поставки полностью подготовлен к работе, но в непредвиденных ситуациях может возникнуть необходимость в ремонте ПК и последующей переустановке ОС или только переустановке ПО управления.

Инсталляция ПО управления выполняется после инсталляции ОС и Microsoft Office, установки драйверов оборудования. Установка может проводиться только под учетной записью с правами администратора. В поставку входит CD диск, содержащий всю документацию в электронном варианте, драйвера для плат управления, а также дистрибутив программы управления. Этот дистрибутив необходимо запустить и следовать инструкциям мастера установки.

Установка производится в директорию «HVG\_500\_P» на системном диске. Ярлыки для запуска ПО создаются автоматически – на Рабочем Столе и в меню «Программы» кнопки «Пуск». Ярлыки имеют название «HVG\_500\_P» и ссылаются на файл Run.exe. Сама программа управления запускается файлом HVG\_500\_P.exe, но делать это не рекомендуется.

В процессе инсталляции автоматически создается новая учетная запись hvg500p с правами администратора. При запуске файла Run.exe автоматически производится подключение к этой учетной записи, и выполняется запуск программы управления - от имени hvg500p. Это сделано для того, чтобы не было необходимости разглашать пароль администратора ПК тем операторам установки, у которых достаточно прав «Опытного пользователя» или «Пользователя» (лаборанты, студенты и т.д.).

### **Создание базы данных и нового испытания**

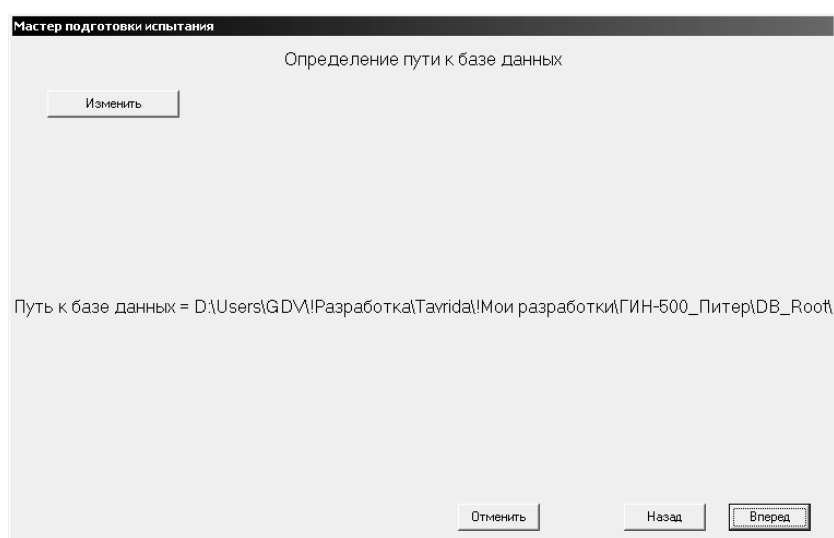
Создание новой базы данных может стать необходимостью в следующих случаях:

- после инсталляции ПО
- при приближении размеров текущей базы к вместимости сменного носителя.

Порядок действий при создании нового испытания:

- выбрать в главном меню программы пункт «Создать новое» и в нем подпункт «Исследовательское»
- нажимать на кнопку «Вперед» в появившемся «Мастере подготовки испытания», заполняя поля для ввода информации на его страницах
- на последней странице Мастера нажать кнопку «Создать»

На первой странице Мастера (рис.П.1) предоставляется возможность изменить текущую **директорию базы данных** (или создать новую), нажав кнопку «Изменить» и следуя дальнейшим инструкциям.



**Рисунок П.1.** Первая страница «Мастера подготовки испытания» - «Определение пути к базе данных»

Перечисленных действий для создания базы данных достаточно. Если оператором не преследуется цель создания испытания, то можно нажать кнопку «Отмена» для закрытия «Мастера». Если же есть необходимость создать новое испытание, то нужно нажать кнопку «Вперед».







На следующей странице Мастера (рис.П.2) необходимо ввести параметры испытуемого образца (ИО) и параметры испытания. Обязательным является поле «Номер программы-заявки». Текст, введенный в это поле, станет названием испытания и его папки, хранящейся в корне дерева испытаний. При вводе текста в это поле необходимо помнить, что максимальная длина пути файла 255 символов.

Остальные поля будут доступны для изменения из основного окна программы, и заполнить их можно после создания испытания, но рекомендуется делать это в «Мастере подготовки испытания».

Некоторые поля представлены в виде выпадающих списков. Это сделано для того, чтобы сохранять наиболее часто используемые значения полей. Для того чтобы добавить значение в выпадающий список поля, нужно набрать это значение в поле, а затем нажать клавишу ввода на клавиатуре - «Enter». Тогда при создании испытаний в будущем достаточно будет выбрать это значение в выпадающем списке.

**Рисунок П.2.** Вторая страница «Мастера подготовки испытания» – «Определение параметров»

На следующей странице Мастера (рис.П.3) задаются критерии соответствия прикладываемых импульсов напряжения. По-умолчанию в качестве критериев соответствия используются ограничения на параметры импульса, оговоренные в ГОСТ-1516-97. Набор нормативных документов представлен в виде таблицы в базе данных, которую можно редактировать. Для редактирования служит панель из 9 кнопок (описание назначения кнопок, слева направо):

-  для перемещения по таблице документов
-  для добавления нового документа
-  для удаления выбранного документа
-  для инициализации редактирования полей
-  для применения изменений полей (сохранения новых значений в базе данных)
-  для отката изменений текущего документа

**Мастер подготовки испытания**

Определение критериев

Документ, в котором заданы параметры импульсов:

Длительность импульса	<input type="text" value="50"/> мкс	Отклонение -	<input type="text" value="20"/>	+	<input type="text" value="20"/> %
Длительность фронта	<input type="text" value="1.2"/> мкс	Отклонение -	<input type="text" value="30"/>	+	<input type="text" value="30"/> %
Отклонение испытательного напряжения от требуемого значения		-	<input type="text" value="3"/>	+	<input type="text" value="3"/> %
Выбросы на пике импульса относительно его амплитуды			<input type="text" value="5"/>		%
Количество импульсов при каждом подключении			<input type="text" value="15"/>		

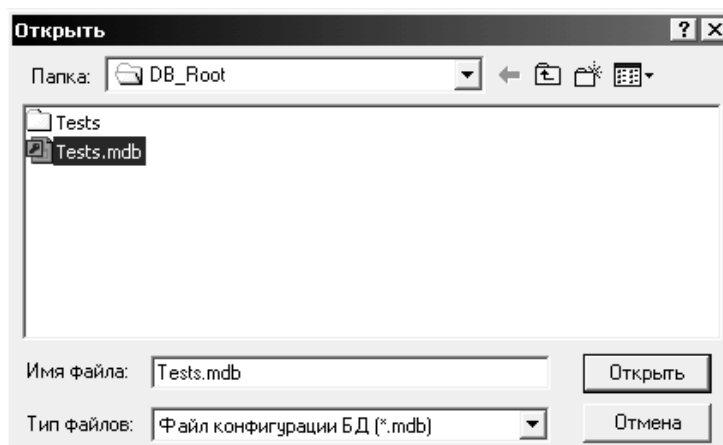
**Рисунок П.3.** Третья страница «Мастера подготовки испытания» - «Определение критериев»

На следующей (четвертой) странице «Мастера подготовки испытаний» оператор должен подтвердить правильность введенных на предыдущих страницах данных нажатием кнопки «Создать». После этого в **корне дерева** испытаний будет создана пустая папка испытания с указанным при создании названием.

## Подключение базы данных

Подключение базы данных может понадобиться в следующих для просмотра испытаний, хранящихся в архиве на сменном носителе. Для подключения базы данных необходимо выполнить следующие действия:

- вставить сменный носитель в устройство чтения (например, CD в CD-ROM)
- щелкнуть правой кнопкой мыши на дереве испытаний для вызова всплывающего меню
- в появившемся меню выбрать пункт «Указать путь»
- в появившемся после этого диалоге выбора файлов (рис.П.4) указать файл *Tests.mdb* в директории базы данных на сменном носителе
- подождать несколько секунд до появления в дереве базы данных структуры загруженной базы.



*Рисунок П.4. Диалог выбора файла в директории базы данных*

После просмотра базы данных из архива необходимо загрузить базу данных, которая была текущей до просмотра архива. Для этого повторить описанные выше действия, но при указании пути к базе в диалоге выбора файлов выбрать файл Tests.mdb в директории базы данных, которая была загружена до просмотра архива, например, «D:/DB\_Root-01/Tests.mdb».

### **Загрузка испытания**

Для проведения испытания необходимо указать программе, какую папку дерева испытаний использовать для хранения новой информации. Т.е. нужно **загрузить** это **испытание** в память программы. Допускается загрузка испытания, которое проводилось ранее. В этом случае информация будет дописываться после уже существующей. Загрузка испытания проводится следующим образом:

- щелчком левой кнопки мышки в дереве испытаний выделить выбранную папку,
- щелкнуть на ней же правой кнопкой мышки для вызова всплывающего меню
- в появившемся меню выбрать пункт «Загрузить испытание <XXX>», где <XXX> - название выделенного испытания
- подождать несколько секунд до появления в заголовке главного окна программы надписи «Текущая папка испытания: <XXX/YYY...>». В <XXX/YYY...> указан путь от корня дерева испытания.

### **Создание задания**

Для того чтобы начать проведение испытания, нужно воспользоваться соответствующим интерфейсом. Этот интерфейс реализован в виде таблицы, в которой оператор формирует **задание**. Каждое задание есть предписание программе на выполнение серии импульсов, которая характеризуется следующими параметрами:

- Номер серии (сквозная нумерация серий в испытании, формируется автоматически)
- Всего импульсов – количество импульсов в серии
- Полярность
- Ууст. [кВ] – напряжение установки, ожидаемая амплитуда импульсов в серии
- Угин. [кВ] – напряжение установки после выполнения атмосферной коррекции, вычисляется автоматически
- Примечание – любая текстовая информация до 250 символов
- Пауза – минимальный интервал времени между импульсами
- Условие окончания – условие окончания выполнения серии
- Кол-во – является управляющим для условия окончания серии
- Повтор серии – предписание выполнять или не выполнять автоматический повтор серии в случае успешного завершения предыдущей
- Сделано импульсов – реально выполненное количество импульсов в серии
- Причина окончания – указывает реальную причину окончания серии
- Подключение – формула подключения испытуемого образца к установке
- Вкл.коррект. – указывает на то, была ли включена коррекция напряжения на момент создания задания
- Температура, Влажность, Давление – параметры окружающей среды на момент создания задания (заполняются автоматически)
- K1, K2 – коэффициенты атмосферной коррекции.

### **Создание задания:**

- в главном окне программы перейти на вкладку «Испытание»
- перейти на вкладку «Задания» - под полем вывода осциллограмм
- щелкнуть правой кнопкой мышки на таблице «Задания» для вызова всплывающего меню
- в появившемся меню выбрать «Добавить задание»
- в появившемся окне «Редактирование очередного задания» (рис.П.5) скорректировать поля и затем нажать кнопку «Заккрыть»

После выполнения указанных действий в таблице «Задания» программой будет добавлена очередная строка. Созданное задание можно удалить (в всплывающем меню таблицы выбрать пункт «Удалить последнее») или откорректировать (в всплывающем меню таблицы выбрать пункт «Редактировать последнее»).

Редактирование очередного задания

Количество импульсов: 1

Полярность: +

Уст. кВ: 160,0

Примечание:

Пауза, с: 2

Условие оконч.: Серия: Выполн. все имп.

Кол-во: 0

Повтор серии: Нет

Подключение: Test

Закреть

**Рисунок П.5.** Окно «Редактирование очередного задания»

### Описание полей окна «Редактирование очередного задания»

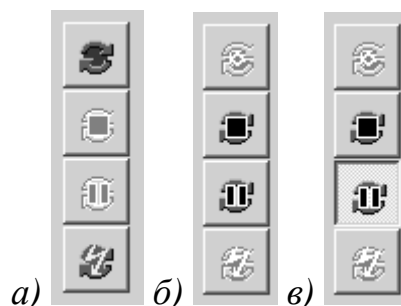
- Количество импульсов – может быть любым от 1 и выше. При значении поля «10» означает, что задаваемая серия импульсов будет состоять из 10 импульсов,
- Полярность – определяет полярность прикладываемых импульсов в серии,
- Уст. [кВ] – амплитуда импульсов в серии. Существует диапазон допустимых значений для этого поля в зависимости от загруженной конфигурации – ГИН-200 или ГИН-500. В первом случае диапазон допустимых значений – 50-175кВ, во втором – 175-500кВ
- Пауза, [с] – задержка по времени между двумя соседними импульсами в серии. Определяет минимальное время. Т.е. в случае, если указанное время истечет до полного заряда конденсаторных батарей установки, то импульс не произойдет раньше того, как будет закончен заряд. Если же заряд закончится раньше, то импульс не будет произведен до истечения указанного в этом поле значения
- Условие окончания - может принимать следующие значения:
  - *Серия: Полностью успешна* – автоматически выполнять серию и создавать новую до тех пор, пока в серии все импульсы будут без разрядов, если значение поля «Повтор серии» есть «Да». Иначе будет выполнена только одна серия



- *Серия: Всего разрядов  $\geq$*  – автоматически выполнять серию и создавать новую до тех пор, пока количество разрядов не станет равно значению поля «Кол-во», если значение поля «Повтор серии» есть «Да». Иначе будет выполнена только одна серия, с контролем количества разрядов
- *Серия: Выполн. все имп.* – выполнить серию и остановить испытание. Если значение поля «Повтор серии» есть «Да», то серии создаются и выполняются автоматически до остановки испытания вручную.
- *Серия: Разр. на спаде  $\geq$*  – автоматически выполнять серию и создавать новую до тех пор, пока количество разрядов на спаде не станет равно значению поля «Кол-во», если поле «Повтор серии» установлено в значение «Да». Иначе будет выполнена только одна серия, с контролем количества разрядов на спаде
- *Серия: Разр. на фр.  $\geq$*  – автоматически выполнять серию и создавать новую до тех пор, пока количество разрядов на фронте не станет равно значению поля «Кол-во», если поле «Повтор серии» установлено в значение «Да». Иначе будет выполнена только одна серия, с контролем количества разрядов на фронте
- *Серия: Кол-во успешных  $\geq$*  – автоматически выполнять серию и создавать новую до тех пор, пока количество импульсов без разряда не станет равно значению поля «Кол-во», если поле «Повтор серии» установлено в значение «Да». Иначе будет выполнена только одна серия, с контролем количества импульсов без разряда
- *Успешных подряд  $\geq$*  – автоматически выполнять серию и создавать новую до тех пор, пока количество импульсов без разряда подряд не станет равно значению поля «Кол-во», если поле «Повтор серии» установлено в значение «Да». Иначе будет выполнена только одна серия, с контролем количества импульсов без разряда подряд
- Кол-во – определяет количество импульсов для условия окончания серии,
- Повтор серии – указывает на необходимость автоматического создания и выполнения следующей серии импульсов после окончания предыдущей,
- Подключение – формула подключения испытываемого образца к установке.





### **Запуск выполнения задания**

Для управления выполнением задания в программе предусмотрена панель кнопок (рис.П.6). Она расположена в правой части панели под полем осциллограмм. Для исключения неверного нажатия на кнопки заблокированы те из них, чья функция в данный момент времени не может использоваться.

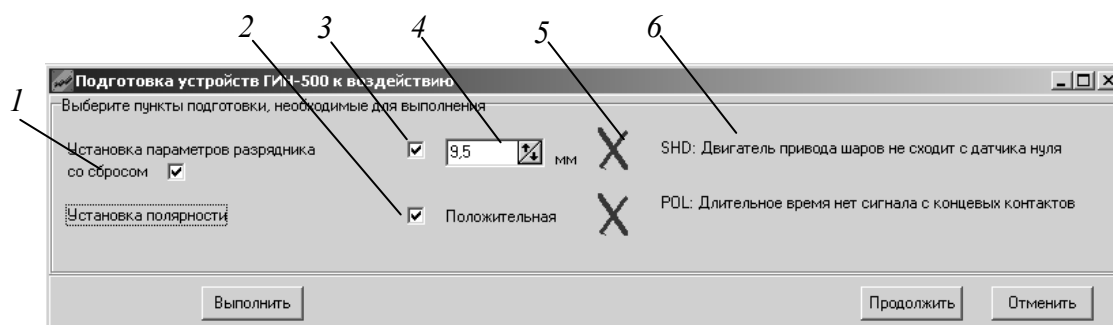


**Рисунок П.6.** Панель кнопок управления выполнением задания: а) режим готовности к запуску выполнения задания; б) режим выполнения задания; в) режим паузы в выполнении задания

Назначение кнопок, сверху вниз:

-  - Запуск задания на выполнение.
-  - Остановка выполнения задания.
-  - Пауза в выполнении задания.
-  - Вызов окна «Подготовка устройств ГИН-500 к воздействию».

Чтобы запустить выполнение задания необходимо нажать кнопку «Запуск задания на выполнение». После этого появится окно «Подготовка устройств ГИН-500 к воздействию» (рис.П.7).



**Рисунок П.7.** Окно «Подготовка устройств ГИН-500 к воздействию»: 1 – флаг установки параметров разрядника с обнулением, 2 – флаг установки полярности, 3 – флаг установки параметров разрядника, 4 – поле корректировки расстояния между шарами разрядника, 5 – графический маркер результата выполнения операции, 6 – текстовый маркер результата выполнения операции.

Модули установки, нуждающиеся в настройке перед проведением воздействия и не указанные в этом окне, настраиваются программой автоматически во время серии импульсов, или непосредственно перед началом серии, или непосредственно перед проведением каждого

импульса. Для выполнения подготовки нужно нажать кнопку «Выполнить».

В случае успешного ее проведения каждый выбранный пункт подготовки будет отмечен зеленой галочкой. Если подготовка какого-либо пункта не выполнена, в правой части окна появится сообщение об ошибке, а пункт будет отмечен красным крестом.

Возможные сообщения об ошибках подготовки разрядника и их интерпретация:

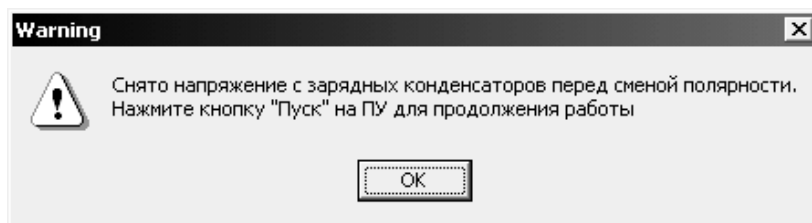
- «*SHD: Двигатель привода шаров не сходит с датчика нуля*» – в течение более чем 5 секунд не пропадает сигнал от датчика нулевого положения шаров разрядника, при этом на двигатель разрядника непрерывно подана команда на движение.
- «*SHD: Двигатель привода шаров неожиданно остановился*» – в течение более чем 5 секунд нет сигнала, информирующего о том, что двигатель разрядника работает, при этом на двигатель разрядника непрерывно подана команда на движение.
- «*SHD: Двигатель привода шаров недоступен*» – в течение более чем 5 секунд нет сигнала, информирующего о том, что двигатель разрядника начал работать, при этом на двигатель разрядника непрерывно подана команда на движение.
- «*SHD: Полярность заряда не соответствует требуемой*» – означает, что полярность заряда конденсаторов модуля генератора не совпадает с той, которая указана в задании на выполнение серии импульсов.

Возможные сообщения об ошибках изменения полярности и их интерпретация:

- «*POL: Истекло время ожидания смены полярности*» – положение датчиков полярности не изменилось через 15 секунд после подачи соответствующего управляющего сигнала модулю смены полярности.
- «*POL: Длительное время нет сигнала с концевых контактов*» – датчики полярности сигнализируют о том, что смена полярности началась (в текущий сеанс связи с модулем смены полярности или до него), но длится недопустимо долго.

Если пункт «Установка полярности» отмечен галочкой, а текущая полярность не соответствует полярности подготавливаемого воздействия, то перед сменой полярности появится сообщение «Снято напряжение с зарядных конденсаторов перед сменой полярности. Нажмите кнопку "Пуск" на ПУ для продолжения работы», которое уведомляет о том, что программа автоматически подала команду на отключение ИУ от сети питания, а также на сброс заземляющей удочки для того, чтобы в случае наличия напряжения на конденсаторах модуля генератора не произошло выхода из строя модуля зарядного. Оператор должен нажать на зеленую кнопку «Пуск» на ПУ, а **затем** подтвердить, что указанное в сообщении

действие выполнено, нажатием кнопки «ОК» в окне данного сообщения (рис.П.8).



*Рисунок П.8. Уведомление об отключении ИУ от сети питания*

После выполнения подготовки устройств оператор может нажать на кнопку «Продолжить», и установка будет приведена в действие с целью воспроизведения серии импульсов в соответствии с последним заданием. Т.о. нажатием кнопки «Пуск» производится запуск выполнения задания.

## Результаты обработки осциллограмм

После воспроизведения каждого импульса в таблице «Импульсы» под полем осциллограмм на одноименной вкладке появляется новая запись с параметрами проведенного импульса. Параметры делятся на группы:

- Предопределенные – «№ серии», «№ сквозн.», «№ в серии», «Полярн.», формируются программой непосредственно перед записью в таблицу, но являются предсказуемыми.
- Измеряемые – «U гин» – напряжение на конденсаторах модуля генератора непосредственно перед **командой поджига**.
- Динамические - «Осц», «Примечание», значение этих параметров может изменяться оператором в любое время после окончания серии.
- Расчетные – «Разряд», «Т фр.», «Т имп.», «Т разр.», «U имп.», «U разр.» – параметры, значение которых получено программой в результате обработки осциллограммы импульса

Некоторые параметры импульса открыты для изменения оператором. Для того чтобы скорректировать параметры, необходимо:

- щелкнуть левой кнопкой мышки по той записи в таблице, которую нужно корректировать
- щелкнуть правой кнопкой мышки на таблице «Импульсы» для вызова всплывающего меню
- в появившемся меню выбрать пункт «Изменить параметры импульса». Всплывет окно «Изменение параметров импульса» (рис.П.9)
- выполнить корректировку
- нажать кнопку «Применить»

Изменение параметров импульса №3

Длительность импульса, мс

Пиковое значение, кВ

Амплитуда импульса, кВ

Длительность фронта, мс

Время разряда, мс

Напряжение разряда, мс

*Рисунок П.9. Окно «Изменение параметров импульса»*

В любое время после выполнения корректировки оператор может сделать «откат» любых изменений в параметрах импульса, нажав кнопку «В расчетное». При этом все поля будут перезаписаны теми значениями, которые были получены программой во время обработки осциллограммы.

Корректировка характера импульса (разряд на фронте, разряд на спаде, нет разряда) выполняется непосредственно из таблицы с помощью выпадающего списка меню поля «Разряд».

## Управление полем отображения осциллограмм

Поле осциллограмм служит для вывода следующей информации:

- осциллограмма импульса исходная
- осциллограмма огибающей
- сетка координат
- курсоры осциллограмм
- номер импульса по сквозной нумерации в испытании
- расчетные параметры импульса
- сообщения о несоответствии импульса

На осциллограмме огибающей укрупнено прорисовываются контрольные точки огибающей сигнала:

- начало импульса (закрашенной точкой)
- 30% от максимального значения на фронте (закрашенной точкой)
- 90% от максимального значения на фронте (закрашенной точкой)
- максимум сигнала (закрашенной точкой)
- 50% от максимального значения на спаде (закрашенной точкой)
- разряд на фронте (незакрашенным треугольником)\*
- разряд на спаде (незакрашенным прямоугольником)\*

\* - для импульсов с разрядом

Параметры поля осциллограмм доступны в параметрах программы.

Поле осциллограмм содержит всплывающее меню, пункты которого делятся на две группы:

- корректировка масштаба и положения
  - *Нормализовать* – вписать осциллограммы в поле осциллограмм
  - *Перемещение* – перемещение курсора мышки по полю осциллограмм с нажатой левой кнопкой мышки приведет к перемещению осциллограмм по полю
  - *Масштабирование* – перемещение курсора мышки по полю осциллограмм с нажатой левой кнопкой мышки приведет к изменению масштаба
  - *Показать участок* – после выбора этого пункта меню необходимо указать первую точку - левый верхний угол прямоугольника (нажатием левой кнопки мыши в этой точке поля осциллограмм), а также вторую точку - правый нижний угол прямоугольника (отпусканием левой кнопки мыши в этой точке поля осциллограмм). Отмеченный таким образом прямоугольник будет растянут на все поле осциллограмм
  - *Отменить* – отменить выбранное действие и оставить поле осциллограмм без изменений
- дополнительные возможности
  - Активизировать курсор - см. ниже
  - Дополнительно
    - Свойства курсоров
    - В буфер обмена